ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS DEL

E-ICES 17

DECIMOSÉPTIMO ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

1 AL 4 DE NOVIEMBRE DE 2022



Comisión Nacional de Energía Atómica

ices
CENTRO INTERNACIONAL PARA ESTUDIOS DE LA TIERRA

ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS DEL

E-ICES 17

DECIMOSÉPTIMO ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

1 AL 4 DE NOVIEMBRE DE 2022

ices
CENTRO INTERNACIONAL PARA ESTUDIOS DE LA TIERRA

Comisión Nacional de Energía Atómica -CNEA
Actas de trabajos completos del E-ICES 17 : Decimoséptimo Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra / compilación de Martín Pedro Gómez ; Dino Filipussi ; editado por Martín Pedro Gómez ; Dino Filipussi ; Luis Lenzano ; prólogo de Martín Pedro Gómez. - 1a ed compendiada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2023.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-1323-89-0

1. Ciencias Naturales. 2. Ciencias Sociales y Humanidades. 3. Geociencias. I. Gómez, Martín Pedro, comp. II. Filipussi, Dino, comp. III. Lenzano, Luis, ed. IV. Título.
CDD 550.71



ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS

DEL

E-ICES 17

DECIMOSEPTIMO ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Tercer Encuentro Virtual del ICES

AUTORIDADES DEL ICES

CONSEJO DE REPRESENTANTES

Prof. Luis Lenzano (UNCUYO)

Dr. César Belinco (CNEA)

Dr. Manuel Tovar (UNCUYO)

Dr. Roberto Zysler (CNEA)

PRESIDENTE DEL CONSEJO DE REPRESENTANTES

Mag. Ing. Alberto Vich (UNCUYO)

DIRECTOR CIENTÍFICO

Dr. Martín Pedro Gómez (CNEA)

SECRETARIA EJECUTIVA

Dra. Adalgisa Scotti (CNEA)

EDITORES

Martín Gómez, Luis Lenzano y Dino Filipussi

DISEÑO Y COMPAGINACIÓN

Dino Filipussi, Daniela Guevara Vallese, Florencia Lenzano, Mónica Torrejón y Martín Gómez

Impreso en Argentina - Printed in Argentina

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

ISBN 978-987-1323-89-0

© CNEA 2023

DIRECTOR DEL ENCUENTRO

Dr. Martín Pedro Gómez (ICES CNEA, UTN, UNSAM)

COMITÉ ORGANIZADOR

Gustavo Álvarez (ICES CNEA Malargüe)
Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)
Gabriela Coria (ICES CNEA)
Diego Cowes (ICES CNEA)
Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)
Felipe Genovese (UTN FRSR)
Daniela Guevara Vallese (ICES CNEA)
Andrea Juárez (ICES CNEA)
Leticia Katzer (ICES CONICET)
Luis Eduardo Lenzano (ICES-UNCUYO-CONICET)
María Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)
Carlos López (UNCUYO)
Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES CNEA, UNSAM, UTN)
Nicolás Núñez (ICES CNEA)
Valeria Ortega Paredes (ICES CNEA)
Diego Pérez (CNEA)
Laura Salgán (CONICET)
Hernán Sánchez (ICES CNEA)
Adalgisa Scotti (ICES-CNEA-UTN)
Mónica Torrejón (UNCUYO)
Luisina Torres (UNCUYO)
Alejandra Vesga Ramírez (ICES CONICET)
Mag. Alberto Vich (IANIGLA CONICET ICES)
Paula Vildoza (ICES Regional Mendoza)
Hernán Xargay (ICES CNEA))

COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. Mariano Agusto (UBA-CONICET)
Dr. Jorge Barón (ICES UNCUYO)
Dr. Giovanna Cappai (IGAG-CNR, Italia)
Mag. Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)
Mag. Diego Cowes (ICES CNEA)
Dr. Deyan Draganov (TU DELFT, Holanda)
Dr. Ing. Guido Ferrari (UTN-FRD)
Dr. Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)
Dr. César García Ubaque (UDFJC, Colombia)
Dr. Adolfo Gil (CONICET)
Dr. Martín Gómez (ICES CNEA, UTN-FRD, UNSAM)
Dr. Diego González (IMM, Bologna, Italia)
Dra. Daniela Guglietta (IGAG-CNR, Italia)
Dra. Leticia Katzer (CONICET)
Dra. Clara Lamberti (UBA-CONICET)
Dra. María Isabel López Pumarega (ICES)

Prof. Luis Eduardo Lenzano (ICES UNCUYO-CONICET)
Dr. Stefano Millia (IGAG-CNR, Italia)
Dr. Gustavo Neme (CONICET)
Dra. Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES CNEA, UTN-FRD)
Mag. Diego Perez Gagni (CNEA)
Dr. Marcelo Raponi (CITEDEF)
Dr. Linilson Rodrigues Padovese (USP, San Pablo, Brasil)
Dr. José Ruzzante (UTN, UNTREF)
Dra. Laura Salgán (CONICET)
Dra. Adalgisa Scotti (ICES CNEA, UTN)
Dra. Francesca Trapasso (IGAG-CNR, Italia)
Mag. Alejandra Vesga Ramírez (CONICET)
Mag. Ing. Alberto Vich (IANIGLA CONICET)
Dr. Stefano Ubaldini (IGAG-CNR, Italia)
Esp. Ing. Hernán Xargay (ICES CNEA))

COORDINADORES DE SESIÓN (MODERADORES)

Mag. Ing. Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)
Mag. Diego Cowes (ICES CNEA, UNTREF)
Mag. Ing. Guido Ferrari (UTN)
Dr. Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)
Dr. Martín Gómez (ICES CNEA, UTN, UNSAM)
Mag. Andrea Juarez (ICES CNEA)
Dra. Leticia Katzer (CONICET)
Dra. Clara Lamberti (UBA-CONICET)
Prof. Luis Eduardo Lenzano (ICES-UNCUYO-CONICET)
Dra. Miriam Rocío Neyra Astudillo (ICES CNEA, UNSAM, UTN)
Dra. Adalgisa Scotti (ICES-CNEA-UTN)
Mag. Alejandra Vesga Ramírez (CONICET)
Mag. Alberto Vich (IANIGLA CONICET)
Esp. Ing. Hernán Xargay (ICES CNEA))

VIRTUALIDAD

ASESORA DE HERRAMIENTAS VIRTUALES

Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)

RESPONSABLES TÉCNICOS DE SALA VIRTUAL

Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)
Gustavo Álvarez (ICES CNEA Malargüe)
Diego Pérez (CNEA)
Diego Cowes (ICES CNEA)
Martín Gómez (ICES CNEA)

ASISTENTES DE SALA VIRTUAL

Gustavo Álvarez (ICES CNEA Malargüe)
Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)
Gabriela Coria (ICES CNEA)
Daniela Guevara Vallese (ICES CNEA)
María Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)
Carlos López (UNCUYO)
Diego Pérez (CNEA)
Valeria Ortega Paredes (ICES CNEA)
Laura Salgán (CONICET)
Luisina Torres (UNCUYO)
Paula Vildoza (ICES UNCUYO)

COMUNICACIÓN

POR PÁGINA WEB
Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)
Paula Vildoza (ICES UNCUYO)
Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)

POR CORREO ELECTRÓNICO
Daniela Guevara Vallese (ICES CNEA)
Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)

DISEÑO DE PÓSTERES Y COMUNICACIONES
Paula Vildoza (ICES UNCUYO)
Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)
Mónica Torrejón (ICES UNCUYO)

PRÓLOGO

El 17º Encuentro del Centro Internacional para Estudios de la Tierra se llevó a cabo entre el primero y el 4 de noviembre de 2022. Por tercera vez consecutiva, y en las últimas etapas de la pandemia de COVID-19, se realizó de manera virtual. La nueva modalidad trajo muchos cambios en la manera de organizar estos encuentros E-ICES. Algunos para bien y otros no tanto. Entre las ventajas podemos mencionar la posibilidad de incorporar participantes desde lugares lejanos. Entre las desventajas podemos citar la ausencia de algo muy importante en las reuniones científicas, que es el contacto personal tanto en la parte científica académica como en la social.

El Encuentro se desarrolló tal lo esperado, ya con experiencia en el manejo de las reuniones virtuales. Hubo participantes tanto de nuestro país como de muchos países extranjeros en especial de Latinoamérica. Los trabajos fueron expuestos en las modalidades de presentación oral y póster. También se realizaron conferencias plenarias sobre importantes temas científicos de actualidad como el hallazgo del pterosaurio más grande de Sudamérica, el descubrimiento del lago más profundo de América, el desarrollo de una red sismológica en Antártida, las emisiones de la aeronavegación, radiactividad y ambiente, la dimensión escalar en los estudios climáticos, la contaminación con micro plásticos en peces del Río de la Plata, los impactos de los cambios en el uso de la tierra sobre la inflamabilidad de ecosistemas patagónicos y el nuevo universo revelado por el telescopio espacial Webb. También, se realizó una mesa redonda en la cual se expuso un interesante concurso para la fabricación de microsatélites por parte de estudiantes denominado CANSAT.

En total hubo más de 500 participantes y se presentaron 122 trabajos en forma de poster y 101 en modalidad oral de los cuales se evaluaron y compilaron los 45 trabajos que están publicados en estas Actas.

ÍNDICE

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y ESTACIONAL DE LA CLOROFILA BENTÓNICA EN UN INTERMAREAL AFECTADO POR LA ACTIVIDAD ANTRÓPICA
Benjamín Abasto, Eleonora M. Fernández, Maialén Ardusso, Natalia S. Buzzi, Melisa Fernández Severini y Carla V. Spetter 1

HIDROQUÍMICA DE HUMEDALES LAGUNARES HIPERSALINOS DEL OESTE DE BUENOS AIRES, ARGENTINA
Rosario Acosta, Eleonora S. Carol, Guido E. Borzi, Francisco A. Cellone y María del Pilar Álvarez 11

HIDROQUÍMICA Y FACIES EVAPORÍTICAS EN LA LAGUNA DE CHASILAUQUEN, BUENOS AIRES, ARGENTINA
Rosario Acosta, Eleonora S. Carol, María del Pilar Álvarez, Francisco A. Cellonc y Guido E. Borzi 17

DINÁMICA DEL FÓSFORO EN AMBIENTES FLUVIALES AFECTADOS POR DISTINTAS ACTIVIDADES ANTRÓPICAS
Débora N. Alfaro, Eleonora Carol, María del P. Álvarez 23

APORTE DE INFORMACIÓN SATELITAL DEL SAOCOM 1 PARA EL MANEJO GANADERO EN MENDOZA EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO
Gustavo Alvarez, Nicolas Pietrelli †, Santiago Pietrelli, Mauricio Visciglia, Juan Pablo Ríos, Carla Bogado, Jaquelina Bianchini, Gabriela Coria, Laura Frulla, Álvaro Soldano, Martín Gómez, Adalgisa Scotti 33

COMBINACIÓN DE NUBES DE PUNTOS PARA LA DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE ENTORNOS COMPLEJOS: EL CASO DE LA GROTTA DI SAN MICHELE ARCANGELO (ITALIA)
Sara Antinozzi, Lorena Centarti, Albina Cuomo, Alessandro Di Benedetto, Andrea di Filippo, Carla Ferreyra, Caterina Gabriella Guida, Domenico Guida, Marco Limongiello, Juan Pablo Panero 46

VARIABILIDAD DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO
Carolina Aumassanne, Ana Paula Salcedo, Fernanda Gaspari, Jorge Bonilla, Dardo Fontanella 57

HIDRODINÁMICA DE UN SISTEMA ACUÍFERO CON CONFINAMIENTO EN ÁMBITO DE LA CAÑADA DE JEANMARIE, LLANURA PAMPEANA. CÓRDOBA, ARGENTINA
C. Barra, A. Cabrera, M Blarasin 66

ANÁLISIS DE RIESGO HÍDRICO EN LA LOCALIDAD DEL RINCÓN, DEPARTAMENTO POMÁN, PROVINCIA DE CATAMARCA
Solange Barrionuevo Mansilla y Cinthia Lamas 77

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA DESTINADA A CONSUMO HUMANO EN EL BARRIO LA PRADERA DEL PARTIDO DE VILLA GESELL, ARGENTINA
Facundo Barros Cortés, Leonardo Sánchez Caro, Silvina Carretero 86

RELACIONES ENTRE DINÁMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA CON LA DISTRIBUCIÓN Y MORFOLOGÍA DE CUERPOS MEDANOSOS
Fátima Bécher Quinodóz, Mónica Blarasin, Susana Degiovanni, Adriana Cabrera, y Juan Felizzia 96

CONTAMINACIÓN CON MICROPLÁSTICOS EN PECES DE LA COSTA PORTEÑA DEL RÍO DE LA PLATA
Carla M. Bonelli, Marcelo L. Morales Yokobori 108

PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA EN EL MUSEO ESTÉVEZ, ROSARIO, PCIA. DE SANTA FE
María Victoria Bongiovanni, Patricia Martinelli, Peter Zabala Medina, Fernando Oliva 119

PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA EN EL FUERTE BARRAGÁN, ENSENADA, PCIA. DE BUENOS AIRES
María Victoria Bongiovanni, Vivian Grünhut, Patricia Martinelli, Fernando Oliva 130

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA SERRANA BONAERENSE ANTE DIFERENTES EVENTOS PLUVIALES Y CAMBIO DE USO DEL SUELO
Lucia Bottan, M. Isabel Delgado y Fernanda J. Gaspari 141

BIOSÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA A PARTIR DE BIOMASAS FÚNGICAS AISLADAS DE DESECHOS MINEROS
Daniela Bustos, Natalia Hidalgo, Jorge Allende, Ana Senese, Laura García, Inés Castro 153

RAILWAY ARCHEOMETALLURGY: TECHNOLOGICAL, HISTORICAL, CULTURAL AND GEOGRAPHIC MAP THAT ILLUSTRATES THE METALLOGRAPHIC STUDIES ON DIFFERENT RAILWAY ELEMENTS AND THE INSTITUTIONAL LINK WITH THE RAILWAY MUSEUMS
Patricia Carrizo, Rubén Lepez y Miguel Sepúlveda 159

PATRONES DE VARIABILIDAD DE TEMPERATURA MEDIA EN EL OASIS NORESTE DE MENDOZA, ARGENTINA
Martín A. Cavagnaro, Francisco Gonzalez Antivilo, Diego C. Araneo 169

INTERFACE PARA LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES GUIADA POR EVOLUCIÓN DIFERENCIAL
Paola Caymes Scutari, Germán Bianchini, Alessandro Brancolini 176

CARACTERIZACIÓN GRAVIMÉTRICA DEL PROYECTO MINERO DE ARROYO VERDE
Andrés Costa, Marcos E. Bahía, Nicolás Scivetti, Cecilia Pavón Pivetta, Leonardo Benedini 186

COLORES QUE SE HEREDAN: APROVECHAMIENTO DE PLANTAS TINTÓREAS EN MUJERES TEJEDORAS CAMPESINAS DEL SUR DE MENDOZA, ARGENTINA
María P. Diez, Graciela S. Rios y Leonardo S. Paulides 195

EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN UN EMPRENDIMIENTO AGROPECUARIO, VILLA MERCEDES. SAN LUIS. ARGENTINA
Daniel A. Dueñas, Graciela del R. Sosa y Francisco Herrera Sánchez 206

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESTACIONAL DE LAS TENDENCIAS EN foF2 Y SU RELACIÓN CON LA VARIACIÓN DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO
Trinidad Duran, Blas F. de Haro Barbas, Ana G. Elias, Yamila Melendi, Alfredo Juan y Fernando S. Buezas 215

BIODEGRADACIÓN DE XENOBIÓTICOS
José A. Gálvez, José A. Cantero, Sergio A. Vardaro, Cecilia López, Pablo Salomón 226

USO DE MICROORGANISMOS EN MINERÍA: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA SU APLICACIÓN
José A. Gálvez, Sergio A. Vardaro, José A. Cantero, Cecilia López, Lucas Caride, Fernando Lucero 237

MODELO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE SENSOR DE VELOCIDAD DE PARTÍCULAS ACÚSTICAS PARA APLICACIONES EN INFRASONIDOS
Joaquín García, Diego Pérez, Martin Gómez 249

ESTIMACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE MAGNETIZACIÓN POR MÉTODOS INDIRECTOS
Julián L. Gómez y Ana Carolina Pedraza De Marchi 259

PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA EN BALCARCE, PCIA. DE BUENOS AIRES
Vivian Grünhut, M. Victoria Bongiovanni, Patricia Martinelli, Fernando Oliva y Matías De La Vega 268

EXTREMOS COMPUESTOS CÁLIDOS Y SECOS DE VERANO EN DISTINTAS REGIONES DE ARGENTINA Y SU MODULACIÓN POR EL ENSO
Agustina Lopez Ramirez, Mariana Barrucand, Soledad Collazo 278

PERCEPCIONES DE LA PROBLEMÁTICA OCEÁNICA EN UNA AUDIENCIA DE JORNADA ACADÉMICA
Marcelo L. Morales Yokobori, D. Carolina Castellanos Arévalo 288

ATENUACIÓN DE RUIDO EN SECCIONES SÍSMICAS MEDIANTE LA DESCOMPOSICIÓN EN MODOS EMPÍRICOS F-X
Marcos H. Muzi, Julián L. Gómez y Danilo R. Velis 297

USO DE MÉTODOS PIROMETALÚRGICOS PARA LA OBTENCIÓN DE RENIO Y MOLIBDENO
Ivana M. Orozco 309

HIDROGEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO LIBRE Y SU RELACIÓN CON LA GEOMORFOLOGÍA EN EL SECTOR REDUCCIÓN - LAS ACEQUIAS, CÓRDOBA
Lucia Palmero, Fátima Bécher Quinodóz, Verónica Lutri, Mónica Blarasin y Juan Felizzia 318

CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES EN HUMEDALES DE LA PLANICIE COSTERA DE AJÓ
María P. Pasquale Pérez, Eleonora Carol y Lucía Santucci 328

TIERRA DE HORNOS: CONFIGURACIÓN DE PAISAJES CULTURALES Y CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE LADRILLOS EN EL SUR DE MENDOZA, ARGENTINA
Leonardo Salvador Paulides, Juan Sebastian Lewin y Tobías Daniel Corvalán 334

VELOCIDADES DE ONDAS SCHOLTE EN SEDIMENTOS MARINOS: SENSIBILIDAD A LAS PROPIEDADES GEOACÚSTICAS Y PETROFÍSICAS
Claudia L. Ravazzoli, María Florencia Varela y E. Diego Mercerat 344

ACCIÓN DEL FUEGO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL HORMIGÓN ARMADO COMO MATERIAL COMPUESTO
Marianela Ripani, Illarick Balarezo, Hernan Xargay, Paula Folino 356

AISLAMIENTO DE MICORRIZAS NATIVAS DE UN SUELO CERCANO A UNA FOSA PETROLÍFERA CON POTENCIAL USO PARA LA RECUPERACIÓN DE ÁREAS DEGRADADAS
Jesmary Rosas, Afrodita García Angarita, Angela De Sisto, Ysvic Inojosa, Laynet Puentes, Mingrelia España 368

USO INTEGRADO DE DATOS SATELITALES PARA EL MONITOREO DE PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO, ARGENTINA
Ana Paula Salcedo, Carolina Aumassanne, Romina Solorza, Sofia Teverovsky, Susana Haye y Patricio Oricchio 375

POTENCIAL DE BACTERIAS DEGRADADORAS DE ACEITES VEGETALES COMO INÓCULO PARA BIOAUMENTO EN LA REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS
Celene Sánchez Holmedilla, Fausto Silva, Gabriela Piperata, Debora Conde Molina 385

EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA Y RIESGO ASOCIADO EN LAS LADERAS DE LOS CERROS SOLO Y TECHADO NEGRO, VALLE DEL GLACIAR TORRE, PROVINCIA DE SANTA CRUZ
Daniela Schmidt, Diego Winocur y Pierre Pitte 390

ANÁLISIS DE RIPIERAS UTILIZADAS PARA LA EXTRACCIÓN DE MINERALES DE 3° CATEGORÍA EN LA PROVINCIA DE MENDOZA
Cecilia J. Soengas, D. Ezequiel Bernedo Loria e I. Miqueas Butynski 398

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO PARA EL ESTUDIO NO INVASIVO DEL FLUJO DE AGUA EN MEDIOS POROSOS DURANTE PROCESOS DE DISOLUCIÓN
Mariangeles Soldi, Luis Guarracino y Damien Jougnot 405

PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN TÉRMICA Y DE CONFORT EXTERIOR PARA DIFERENTES LCZ ENUNA CIUDAD ÁRIDA
M. B. Sosa, M. F Colli, M.A. Ruiz y E. Correa 412

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MENSUAL EN BUENOS AIRES
Maria Luz Veniard, Candela Sartor, Daniel Perez y Gabriela Lakkis 422

CARACTERIZACIÓN DE FRACTURAS DE ROCAS BASÁLTICAS A PARTIR DE LA DETECCIÓN DE EMISIÓN ACÚSTICA
Alejandra Vesga-Ramírez, M. Eduardo Zitto, Dino Filipussi, Emilio Camilion, Rosa Piotrkowski, Martín Gómez 433

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y ESTACIONAL DE LA CLOROFILA BENTÓNICA EN UN INTERMAREAL AFECTADO POR LA ACTIVIDAD ANTRÓPICA

Benjamín Abasto[ab], Eleonora M. Fernández[ab], Maialén Ardusso[b], Natalia S. Buzzi[bc], Melisa Fernández Severini[b] y Carla V. Spetter[ab]

[a] *Departamento de Química, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA*
[b] *Instituto Argentino de Oceanografía, CONICET/UNS, CCT-BB, ARGENTINA*
[c] *Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA*

e-mail: babasto@iado-conicet.gob.ar

RESUMEN

Las planicies de marea son ambientes altamente productivos y pueden proveer más del 50% de la productividad primaria y secundaria a los estuarios. El microfitobentos es el mayor componente de la comunidad microbiana de los sedimentos intermareales. En este trabajo se evalúa la variación espacial y estacional de la Clorofila a (Cla) bentónica y su relación con los nutrientes disueltos en el agua intersticial durante el 2021, en 6 sitios del intermareal en el estuario de Bahía Blanca (EBB), Argentina: Puerto Cuatreros (PC), Parque Marítimo Almirante Brown (B), Puerto Ingeniero White (IW), Villa del Mar (VM), Puerto Rosales (PR) y Punta Ancla (PA). En bajamar, se colectaron muestras de sedimentos en tubos corer, por triplicado, para la determinación la [Cla] y feopigmentos (Feop) según Gómez et al. (2009). Se determinaron espectrofotométricamente la concentración de fosfatos, nitritos y nitratos en agua intersticial. Se midieron in situ los parámetros fisicoquímicos (pH, Temperatura, Eh). Los sedimentos fueron fraccionados en H_1 (0 – 0,5 mm profundidad), H_2 (0,5 – 10 mm profundidad) y H_3 (10 – 20 mm profundidad). Los resultados mostraron que el H_1 tuvo las mayores [Cla] (7,46 ± 0,09 $\mu g\ g^{-1}$ sed. húm.) y que existen diferencias estadísticas significativas entre las distintas profundidades. La relación entre la Cla / Feop estaría indicando una mayor tendencia al predominio de MO más degradada y un bajo aporte por parte del microfitobentos. Considerando la fracción H_1, donde la producción primaria fue máxima, se pudo observar que la dinámica de la clorofila es particular en cada época a lo largo de todo el estuario. Anualmente, la Cla y los Feop presentaron una leve tendencia a aumentar desde la zona más interna hacia la zona media y luego disminuir paulatinamente hacia la boca del EBB, con excepción de una alta concentración observada en PA. La concentración de macronutrientes fue de: 2,2 – 26,86 µM para fosfatos, 0,11 – 5,21 µM para nitritos y nd – 18,37 µM para nitratos. Valores elevados de fosfatos en invierno estarían indicando una mayor disponibilidad de este nutriente para el crecimiento y desarrollo del fitoplancton. Los sitios B e IW registraron las máximas concentraciones de nutrientes por lo que se supone que existe un aporte de éstos desde los sedimentos a la columna de agua vía agua intersticial. La diferencia observada en la [Cla] en el intermareal del EBB estaría íntimamente relacionada con la granulometría del sedimento y la disponibilidad de nutrientes.

Palabras Clave: Clorofila *a*, Nutrientes, Sedimentos, Intermareal, Estuario de Bahía Blanca.

INTRODUCCIÓN

Los estuarios juegan un rol primordial en donde los procesos biogeoquímicos modifican los flujos de nutrientes desde el continente hacia el mar (Lillebø et al., 2004, Van der Zee et al., 2007). La circulación y mezcla dentro de los mismos son una respuesta del aporte de agua dulce proveniente del continente y de la inyección salina a través de los flujos de marea. Estos factores en conjunto con la morfología le otorgan una característica particular de estratificación vertical (Statham, 2012), las cuales van a influir en el transporte y la distribución de nutrientes, materia orgánica y metales traza.

Los estuarios son caracterizados por la presencia de extensas planicies de marea o marismas, de escasa pendiente, formadas por una mezcla de sedimentos consolidados y no consolidados (limos y arcillas). Estos sitios altamente productivos, pueden proveer más del 50% de la productividad primaria y secundaria (Fernández, 2017). Los sedimentos superficiales de las marismas pueden estar colonizados por diferentes poblaciones de microorganismos fototróficos y quimiotróficos. El microfitobentos (MFB) de los sedimentos intermareales es la fracción más representativa en términos de biomasa y producción (Thornton et al., 2002). Este término agrupa a las microalgas eucariotas, cianobacterias y otras bacterias fotosintéticas que colonizan el sustrato bentónico (MacIntyre et al., 1996). Son una fuente de alimento importante para los organismos que habitan los fondos, dentro de la red trófica bentónica. Al encontrarse en los primeros milímetros del sedimento, pueden controlar la dinámica del oxígeno y el intercambio de nutrientes a través de la interfase sedimento-agua, influenciando la biogeoquímica en sistemas intermareales.

El MFB es capaz de acumular intracelularmente grandes cantidades de nutrientes inorgánicos que pueden usar para su crecimiento cuando la concentración externa de nutrientes disminuye (Bohórquez Ferrando, 2017).

La clorofila representa una fracción importante del total de pigmentos fotosintéticos en los organismos microfitobentónicos (Carlson y Simpson, 2007). Es uno de los indicadores más usados para estimar la biomasa fitoplactónica (Farooq y Siddiqui, 2011). Esta se puede degradar a su vez en feopigmentos (*Feop*), tales como feofitina *a* y feoforbida *a*, los cuales presentan un espectro de absorción similar al de la clorofila, por lo que pueden interferir en la cuantificación de la misma. La estimación de la biomasa microalgal bentónica es una medida del potencial fotosintético, fundamental para evaluar los procesos manejados por la fotosíntesis. Tales procesos incluyen la producción de una mezcla de materia orgánica lábil y refractaria que es producida por fijación de CO_2 y puede ser liberada al sedimento por procesos de fermentación, foto-respiración, expulsados como solutos o por secreción de exopolisacáridos (EPS) (Stal, 2002), influenciando los procesos de estabilización.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estuario de Bahía Blanca (EBB) se ubica en el suroeste de la provincia de Buenos Aires (38° 45’ y 39° 25’ S y los 61° 45’ y 62° 30’ O). Conformado por un canal principal de forma alargada y varios canales secundarios que separan extensas planicies de marea e islas (Piccolo et al., 2008), constituye un ambiente transicional en cuyo interior se desarrolla una intensa actividad humana (Speake et al., 2020). Específicamente sobre esta zona interna se desarrollan varias urbes, entre ellas Gral. Cerri, Bahía Blanca e Ing. White (> 350000 hab en total), sobre este último, se emplaza uno de los principales puertos de la Argentina (“Puerto de Bahía Blanca”). Bordeando el área portuaria la actividad se

 ISBN: 978-987-1323-89-0

intensifica por la aparición de un polo petroquímico compuesto por empresas químicas y petroquímicas, cereales y oleaginosas, así como también una central termoeléctrica. Otra área con gran actividad portuaria se destaca sobre la zona media del canal principal, Punta Alta, con su puerto "Puerto Rosales" (38°55'S y 62°03'O). El EBB posee un régimen mesomareal semidiurno, con un rango máximo de marea que aumenta desde los 2,4 m en la boca del estuario, hasta más de 4 m en su cabecera; producto de su geomorfología, y puede incluso duplicarse por la influencia del viento (Perillo & Piccolo, 1991). La salinidad del agua varía entre 17 y 38 en función a los regímenes estacionales de lluvias, vientos y temperaturas (Freije et al., 2008). Sobre la cabecera y zona media del mismo descargan dos de sus principales afluentes de agua dulce, el río Sauce Chico y el arroyo Napostá Grande, cuyas cuencas cubren un área de 3000 km^2 y en donde se desarrollan actividades agrícolas - ganaderas (Abasto, 2020). Existen otros arroyos menores como el canal Maldonado y el arroyo Saladillo García, cuyos caudales dependen principalmente de las precipitaciones locales. Estos sistemas conducen al transporte de material particulado y nutrientes al estuario lo que genera cambios y efectos en el ecosistema (Spetter, 2006; Spetter et al., 2015, Abasto, 2020). Los puntos de muestreo se localizan sobre la planicie de marea del veril norte del canal principal (ver Fig. 1). En sentido noroeste-sureste, el primero de ellos Pto. Cuatreros (PC), seguido de Brown (B) e Ing. White (IW) en la zona interna del EBB; Villa del Mar (VM) y Pto. Rosales (PR) en la zona media, y Pta. Ancla (PA) en la parte externa del mismo.

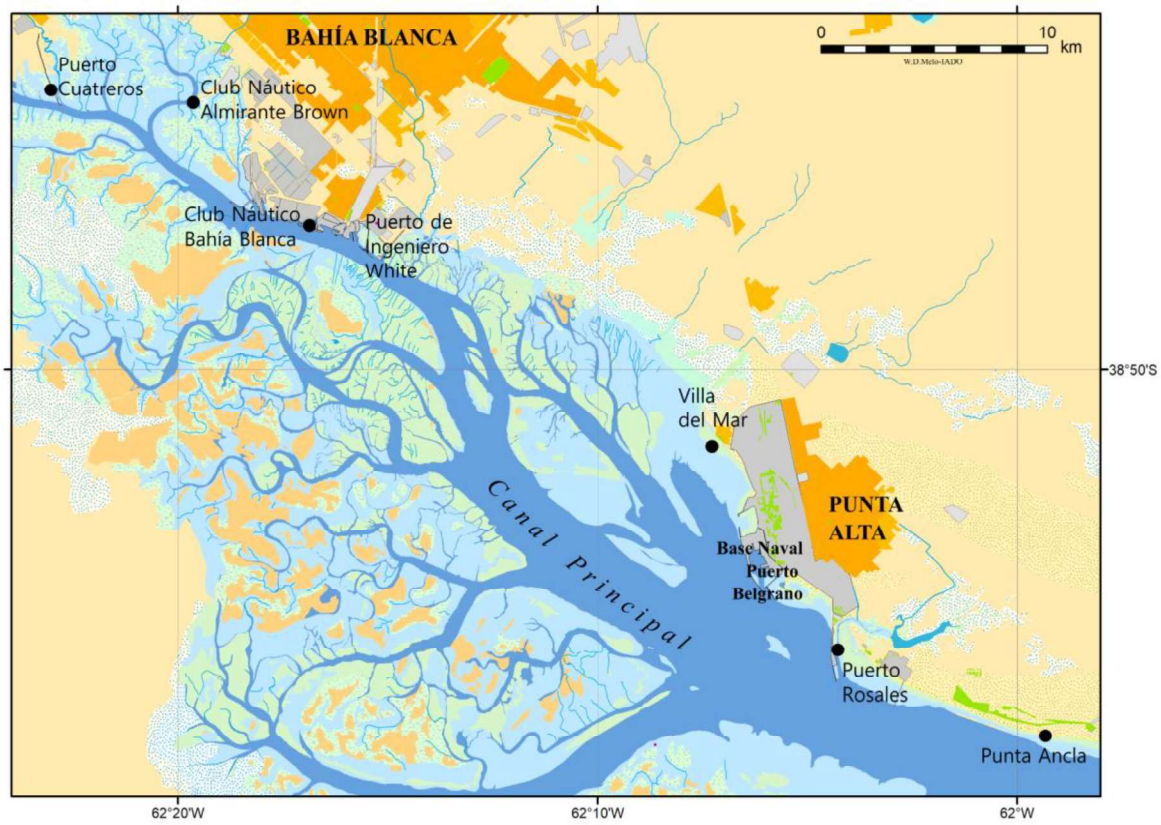


Figura 1. Mapa del estuario de Bahía Blanca donde se visualizan los sitios de muestreo.

Muestreo

Se realizaron campañas estacionales entre otoño del 2021 y verano del 2022. Para poder medir *in situ* pH, Eh y Tempaeratura del sedimento superficial (1-2 cm prof.) se empleó una sonda multisensor *Hanna HI991003*. Por otro lado, se recolectaron muestras de

 ISBN: 978-987-1323-89-0

sedimento para la determinación de clorofila, y de agua intersticial, para la determinación de nutrientes disueltos. El sedimento se tomó por triplicado utilizando mini *corers* de 45 mm de largo y 10 mm de ancho, y se almacenaron en recipientes de plástico negro para evitar su exposición a la luz, y de esta manera la fotooxidación de los pigmentos. El agua intersticial se recolectó *in situ* donde se extrajeron las muestras de sedimento utilizando jeringas y filtros jeringa de 0.45 µm de poro, y se almacenaron en recipientes previamente acondicionados (Gardolinski et al., 2001, Monbet y McKlelvie 2007). Para su conservación, todas las muestras se guardaron a -20 °C hasta su posterior análisis.

Metodología analítica

Los *sedimentos* se fraccionaron en sentido vertical, en tres capas u horizontes (H_1, H_2 y H_3), y luego se pesaron individualmente en balanza analítica (± 0,0001 g) para posteriormente calcular la concentración de pigmentos fotosintéticos en función del peso. Para ello, se realizó una extracción utilizando acetona 90% durante 24 h a la oscuridad y en heladera (4°C) siguiendo el método de Gomez et al., (2009) y utilizando las ecuaciones de Lorenzen et al., (1967). Los resultados se expresaron en microgramo de clorofila *a* por gramos de sedimento húmedo (µg Cl*a* g^{-1} sed húm). En cuanto a la determinación de nutrientes, se siguieron los siguientes métodos espectrofotométricos: Benscheneider y Robinson (1952) para nitritos (NO_2^-) y SM -4500 NO_3^- E (APHA 2017) para nitratos (NO_3^-) y el método clásico de Azul de Molibdeno (Murphy y Riley, 1962) para fósforo reactivo soluble (FRS) como orto-fosfatos. Los resultados de estos últimos fueron expresados en micromolar (µM, micromoles L^{-1}). Todas las lecturas de absorbancia se obtuvieron utilizando un espectrofotómetro UV – visible (Jenway 6715).

Análisis estadístico

La serie de datos fue procesada y analizada utilizando la plataforma *R-RStudio*. Para evaluar la normalidad de los datos se realizó un gráfico q-qplot y posteriormente se procedió a la transformación de los mismos mediante raíz cuadrada. Para este análisis se tuvieron en cuenta tres premisas: ***1-*** Hay una variación en la concentración de Cl*a* entre horizontes, ***2-*** Los máximos de Cl*a* se observan principalmente en la zona más superficial; y ***3-*** Existe una relación entre la concentración de Cl*a* y la disponibilidad de nutrientes. Se utilizó un modelo mixto (lme): sqrt (Cl*a*) ~ Hr + (1|Tubo) * (1|Sitio) * (1|Fecha) para examinar los efectos combinados entre las variables aleatorias *Sitio*, *Corer* y *Fecha*. De igual manera se procedió con los datos de feopigmentos. En paralelo, se aplicó un test de comparaciones múltiples, test de TUKEY. En todos los casos, el nivel de significancia fue del 5% ($p < 0.05$). En el caso de la segunda premisa, se procedió con un Modelo lineal general (lm): ANOVA DOBLE, y luego uno lineal general SIMPLE. Para evaluar la relación entre la concentración de Cl*a* y los nutrientes disueltos se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros fisicoquímicos

Durante el período estudiado, la temperatura superficial para toda la planicie de marea varió entre 4,4 y 27,3 °C, mostrando un ciclo estacional regular, con valores bajos en invierno y más elevados en verano. Los valores de pH fueron similares en todos los sitios de muestreo, observando una leve tendencia a ser más bajos en primavera. El potencial redox (Eh) varió entre -69 y 220 mV. Este regula gran parte de las reacciones biogeoquímicas en el sedimento las cuales a su vez están condicionadas por el comportamiento y la actividad metabólica de los organismos bentónicos. Disminuye

 ISBN: 978-987-1323-89-0

progresivamente en los sedimentos con el incremento de la profundidad, influenciando la distribución de una variedad de caminos metabólicos y respiratorios que involucran diferentes aceptores terminales de electrones (Hoehler, 2004). En el rango de Eh observado los mecanismos que prevalecen son los facultativos anaerobios. En promedio se visualizan valores negativos en la época otoñal y positivos para el invierno y primavera, pero no se pudo observar un patrón definido, ni relación con respecto a las otras variables.

Tabla I. Resumen variables Físico-químicas: pH, Eh y temperatura en los sedimentos superficiales de los seis sitios de muestreo durante otoño 2021 - verano 2022 (casillas vacías: no hay registro).

	Otoño			Invierno			Primavera			Verano		
Sitios	Temp	pH	Eh	Temp	pH	Eh	Temp	pH	Eh	Temp	pH	Eh
C	-	6,86	-11	4,4	7,39	-11	23,9	6,7	4	-	-	-
B	18,7	7,26	-69	9,5	8,03	10	27	7,03	-15	-	-	-
IW	16,8	7,43	-31	7,6	7,45	87	26,75	4	180	-	-	-
VM	19,2	6,91	-63	8,7	7,48	143	25,9	2,82	220	-	-	-
PR	17,4	7,17	101	6,8	7,1	159	27,3	5,6	71	-	-	-
PA	-	-	-	10,9	6,75	103	13,6	-	-	-	-	-

Distribución de la Cl*a* y los *Feop* en el sedimento

La concentración de la Cl*a* resultó variable en el perfil (ver Fig. 2), encontrándose diferencias altamente significativas entre los horizontes estudiados ($p<0.0001$). Los valores de los *Feop*, resultaron ser superiores a los de Cl*a* lo que estaría indicando una tendencia al predominio de materia orgánica (MO) más degradada, por ende, un bajo aporte de microfitobentos y una alta sedimentación de detritos orgánicos parcialmente degradados, asociados a diferentes fuentes naturales y antropogénicas. Por otro lado, se encontraron diferencias significativas en la concentración de *Feop* entre los H_1 y H_2, y altamente significativas entre el $H_1 - H_3$ y $H_2 - H_3$.

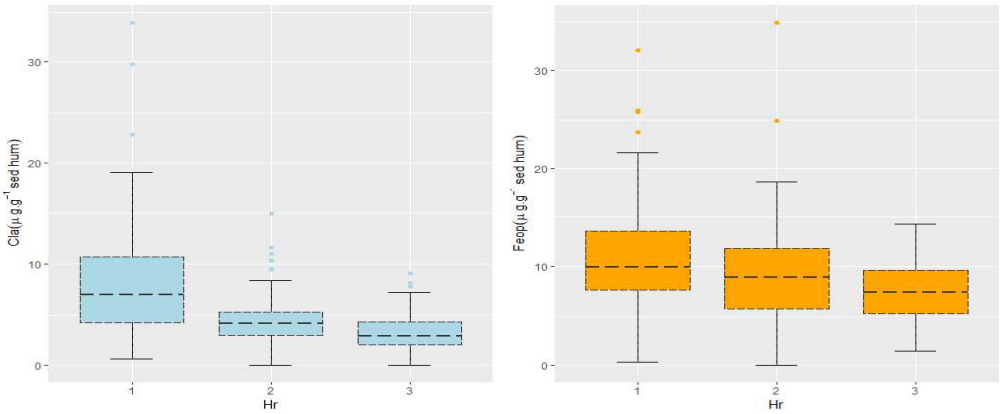


Figura 2. Concentración media y error estándar de los pigmentos fotosintéticos en cada fracción (horizonte) estudiado.

La Cl*a* fue mayor en el H_1 para todos los sitios estudiados debido a que la actividad fotosintética actúa en mayor proporción en los primeros milímetros del sedimento. En base a los resultados obtenidos del ANOVA, se consideró trabajar y analizar la variación espacio - temporal únicamente sobre este horizonte. Tanto IW, como VM y PA no presentaron diferencias significativas en las concentraciones medias de Cl*a* a lo largo del

 ISBN: 978-987-1323-89-0

período estudiado, pero si C, B y PR, donde en los dos primeros, las medias máximas se presentaron en la época invernal (con valores de hasta 33,95 µg Cl*a* g^{-1} sed húm) a diferencia de PR que fue en primavera. Anualmente, la Cl*a* y los *Feop* presentaron una leve tendencia a aumentar desde la zona más interna hacia la zona media y luego disminuir paulatinamente hacia la boca del EBB, con excepción de una alta concentración observada en PA. Estudios anteriores realizados por Fernández et al., (2016) sobre los primeros milímetros de los sedimentos en uno de los sitios estudiados han demostrado que la producción microfitobentónica es máxima durante la estación fría, coincidente con los resultados observados (ver Fig. 3).

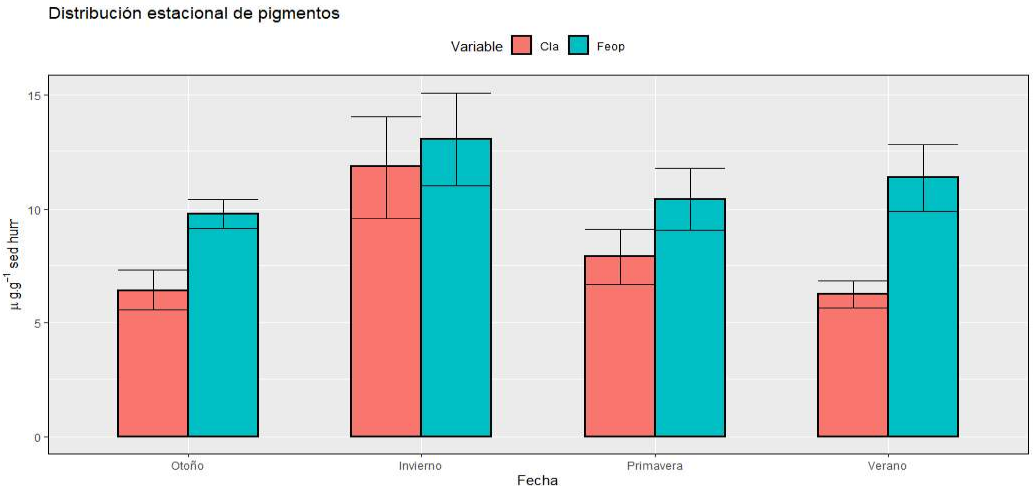


Figura 3. Concentración media y error estándar de Cl*a* y *Feop* durante el período estudiado.

Análisis de los nutrientes disueltos

La concentración de FRS varió entre 2,20 – 26,86 µM, con un valor medio anual de 8,76 µM (ver Fig. 4). Los valores más elevados se registraron en invierno, al igual que la concentración de Cl*a*, a pesar de eso la correlación entre ambas variables a lo largo del año no resultó significativa ($r = 0.11$, $t_{(22)} = 0.54$, $p = 0.59$). Se pudo observar un comportamiento particular a lo largo del estuario, con incrementos desde la zona más interna hacia la zona media y luego una disminución hacia la boca del mismo (con excepción de PA para el verano donde se ve un aumento). Tanto en B como IW se registraron las máximas concentraciones, coincidentes los picos de Cl*a*, lo que podría significar una mayor disponibilidad de nutrientes para crecimiento del microfitobentos en esos sitios.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

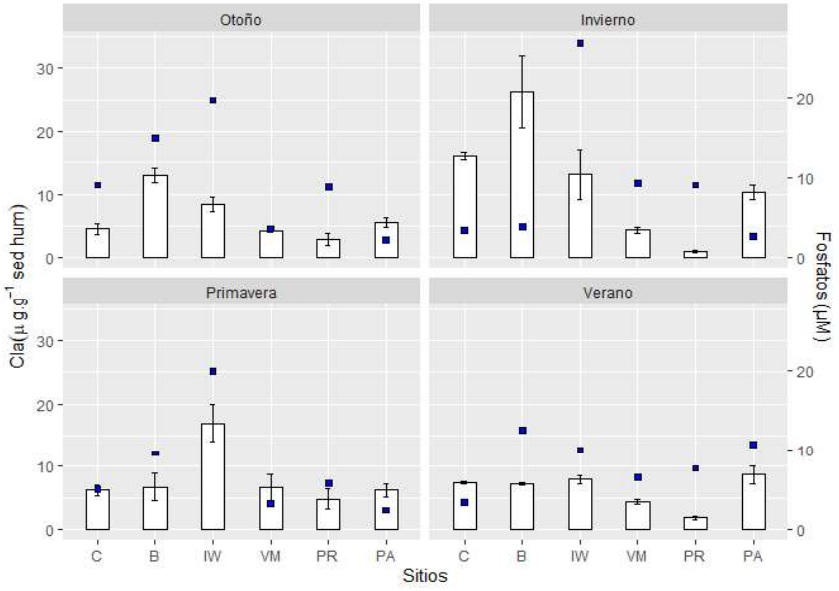


Figura 4. Concentración de FRS (en puntos azules) y Cl*a* (en barras) durante otono 2021 - verano 2022.

En el caso de los NO_2^- y NO_3^- (ver Fig. 5 y 6), los máximos se dieron en B y en otoño, con valores de 5,21 y 18,37 µM, respectivamente. Se pudo observar que la menor concentración de NO_2^- y NO_3^- coincidió con los mínimos hallados para Cl*a*, todos en PR excepto en verano para NO_2^- y en otoño para NO_3^-, sugiriendo una baja disponibilidad de estos nutrientes nitrogenados en PR para el desarrollo del microfitobentos. La correlación entre NO_3^- y Cl*a* resultó ser significativa ($r = 0.41$, $t_{(22)} = 2.10$, $p = 0.04$) pero no así entre y NO_2^- y Cl*a* ($r = 0.37$, $t_{(22)} = 1.85$, $p = 0.07$) a lo largo del año de estudio.

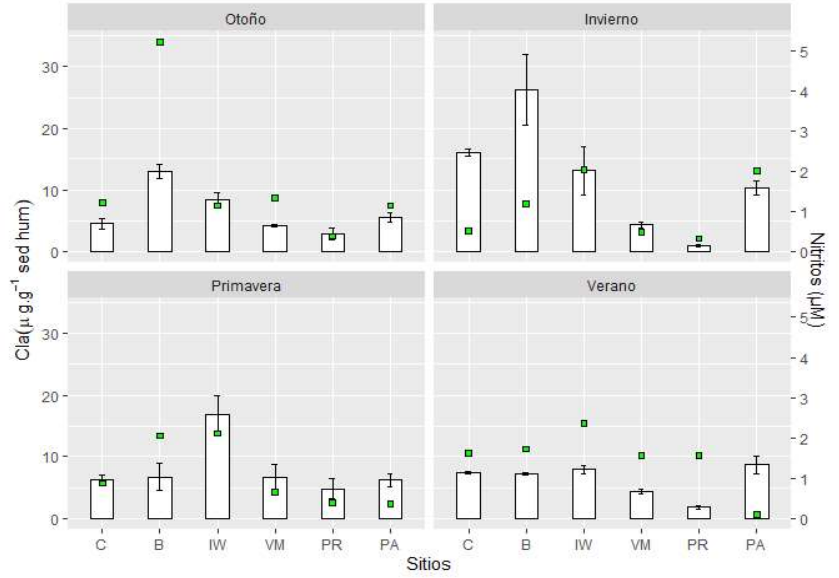


Figura 5. Concentración de NO_2^- (puntos verdes) y Cl*a* (en barra) durante otoño 2021 - veranos 2022.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

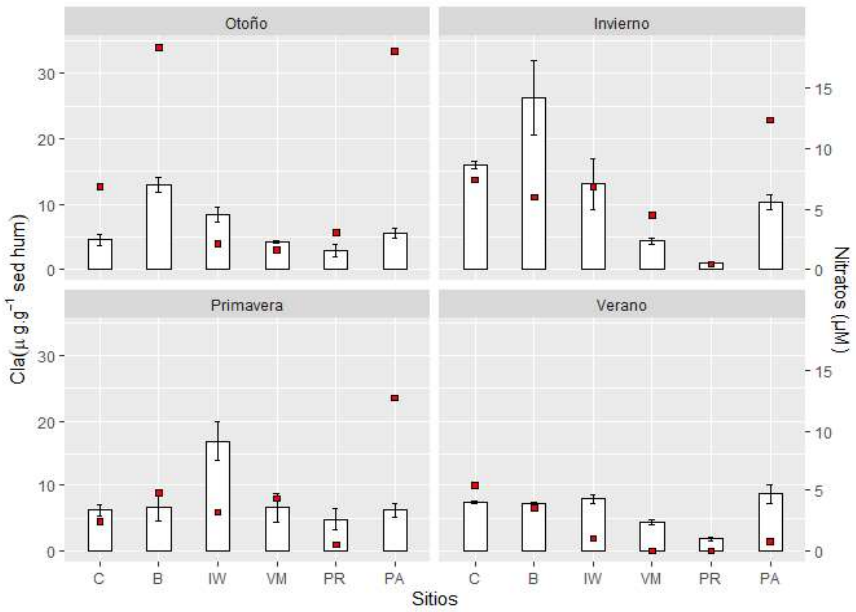


Figura 6. Concentración de NO_3^- (puntos rojos) y Cl*a* (en barra) durante otoño 2021 - verano 2022.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se pudo detectar la máxima concentración de Cl*a* en el H_1 y en invierno, coincidente con estudios anteriores. De acuerdo a la relación utilizada, Cl*a* / *Feop*, se sugiere que los sedimentos de la planicie de marea parecen contener un elevado contenido de detritos provenientes de la columna de agua. La concentración de nutrientes inorgánicos disueltos fue mayor en los sitios B e IW lo que estaría indicando un aporte de nutrientes desde los sedimentos a la columna de agua vía agua intersticial. Los sitios B e IW registraron los mayores valores medios de concentración de las variables analizadas. A su vez, se detectó una baja disponibilidad de los nutrientes nitrogenados estudiados en PR, para el crecimiento microfitobentónico.

REFERENCIAS

Abasto, B. Evaluación estacional de amonio, carbono orgánico particulado y clorofila en el río Sauce Chico y el arroyo Napostá Grande como principales tributarios del estuario de Bahía Blanca. Tesina de Licenciatura en Química, Departamento de Química, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 69 pp. (2020).

Baird, R., and Bridgewater, L. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition. (Eds.) AWWA, WEF, Washington, D.C.: American Public Health Association (2017).

Benschneider, K., Robinson, R. J. A new spectrophotometric method for detection of nitrate in sea water J. Mar. Res., 2, pp. 339-355 (1952).

Bohórquez Ferrando, J. Ecología del microfitobentos en sedimentos intermareales: interacciones biológicas y biogeoquímicas. Tesis doctoral. Universidad de Cádiz (2017).

Carlson, R. E., and Simpson, J. A Coordinator's Guide to Volunteer Lake Monitoring Methods. North American Lake Management Society. 96 pp (2007).

Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., and Eaton, A. D. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.). Washington, 996: American Public Health Association (1998).

Farooq, S., and Siddiqui, P. J. A. Distribution of chlorophyll in the mangrove sediments of Sonmiani bay, Pakistan. Pakistan Journal of Botany, 43(1), 405-410 (2011).
Fernández, E. M. Dinámica de Nutrientes, Materia Orgánica y Clorofila a en planicies de marea cubiertas por matas microbianas. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina (167pp) (2017).
Fernández, E. M., Spetter, C. V., Martinez, A. M. Carbohydrate production by microbial mats communities in tidal flat from Bahía Blanca Estuary (Argentina). Environ Earth Sci 75, 641 (2016).
Gardolinski, P. C. F., Hanrahan, G., Achterberg, E. C., Gledhill, M., Tappin, A. D., House, W. A., Worsfold, P. J. Comparison of sample storage protocols for the determination of nutrients in natural waters. Water Research 35 (15): 3670-3678 (2001).
Goméz, N., Donato, J. C., Giorgi, A., Guasch, H., Mateo, P., Sabater, S. Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial, Separata del Capítulo 12: pág. 234-236 (2009).
Lencina, MMS., Productividad primaria del fitobentos del estuario de Bahía Blanca, Puerto Cuatreros. Tesina de Licenciatura en Química, Departamento de Química, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, 38 pp (2007).
Lorenzen, C. J. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. Limnol Oceanograf. 12: 343-348 (1967).
Lozano-Zarto, H., Garay-Tinoco, J., Ramírez, G., Betancourt, J., Marín, B., Cadavid, B., Panizzo, L., Lesmes, L., Sánchez, J.E., Franco-Herrera, A. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos (2003).
MacIntyre, H. L., Geider, R. J., Miller, D. C. Microphytobenthos: the ecologicalrole of the "secret garden" of unvegetated, shallow-water marine habitats. I: distribution, abundance and primary production Estuaries, 19, pp. 186-201 (1996).
Monbet, P. and McKlelvie, I, D. Phosphates. In: Mollet, L. (Ed.) Handbook of Water Analysis, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York: 219-251 (2007).
Murphy, J., and Riley, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta, 27: 31-36 (1962).
Perillo, G. M., and Piccolo, M. C. Tidal response in the Bahía Blanca estuary, Argentina. Journal of Coastal Research, 437-449 (1991).
Simpson, SL, Batley GE, Chariton AA, Stauber JL, King CK, Chapman JC, Hyne RV, Gale SA, Roach AC, Maher WA. Handbook for sediments quality assessment (CSIRO: Bangor, NSW) (2005).
Speake, M. A., Carbone, M. E., and Spetter, C. V. Análisis del sistema socio-ecológico del estuario Bahía Blanca (Argentina) y su impacto en los servicios ecosistémicos y el bienestar humano. Investigaciones Geográficas (Esp), (73), 121-145 (2020).
Spetter, C. V. Ciclo biogeoquímico de nutrientes inorgánicos de nitrógeno en los humedales del estuario de Bahía Blanca. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina (158pp) (2006).
Spetter, C. V., Buzzi, N. S., Fernández, E. M., Cuadrado, D. G., Marcovecchio, J. E. Assessment of the physicochemical conditions sediments in a polluted tidal flat colonized by microbial mats in Bahía Blanca Estuary (Argentina). Marine Pollution Bulletin 91 (2): 491-505 (2015a).
Spetter, C.V., Popovich, C.E.; Arias, A.H.; Asteasuain, R.O., Freije, R.H., Marcovecchio, J.E. Role of Nutrients in Phytoplankton Development during a Winter Diatom Bloom in a Eutrophic South American Estuary (Bahía Blanca, Argentina). Journal of Coastal Research, 31(1), 76 – 87. Coconut Creek (Florida) (2015b).
Stal, L.J. Cyanobacterial mats and stromatolites. In: Whitton BA, Potts M (eds). The Ecology of Cyanobacteria. Their Diversity in Space and Time. Kluwer Academic Publishers, USA: pp 61-120 (2002).
Statham, P. J., Nutrients in estuaries--an overview and the potential impacts of climate change. The Science of the total environment, 434, 213–227 (2012).
Strickland, J. D. H and Parsons, T. R. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Fish. Res. Board Can. Bull.167, 1st ed. 194pp (1968).

Thornton, D. C. O., Dong, L. F., Underwood, G. J. C., Nedwell, D. B. Factors affecting microphytobenthic biomass, species composition and production in the Colne Estuary (UK), Aquat. Microb. Ecol., 27, pp. 285-300 (2002).
Wurl, O. (Ed.), Practical Guidelines for the Analysis of Seawater (1st ed.). CRC Press. (2009).

HIDROQUÍMICA DE HUMEDALES LAGUNARES HIPERSALINOS DEL OESTE DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

Rosario Acosta[a], Eleonora S. Carol[a], Guido E. Borzi[a], Francisco A. Cellone[b] y María del Pilar Alvarez[c]

[a]*Centro de Investigaciones Geológicas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de La Plata (CIG – CONICET – UNLP), ARGENTINA*
[b]*Centro de Investigaciones del Medio Ambiente, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de La Plata (CIM – CONICET – UNLP), ARGENTINA.*
[c]*Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales, Centro Nacional Patagónico, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IPEEC – CENPAT – CONICET), ARGENTINA.*

e-mail: racosta@cig.museo.unlp.edu.ar

RESUMEN

El sector centro-sur de la Cuenca de Macachín se encuentra atravesado por valles transversales, uno de los cuales es conocido como Valle Maracó – Grande. El extremo terminal oriental del mismo, ubicado en el oeste de la Provincia de Buenos Aires, presenta depresiones asociadas a cubetas de deflación, que albergan humedales lagunares salinos e hipersalinos. El objetivo del presente trabajo es realizar una caracterización hidroquímica del agua superficial y subterránea de 3 humedales lagunares que se desarrollan en la parte terminal del Valle Maracó – Grande. Para ello, se definió una red de monitoreo teniendo en cuenta la geomorfología de la región y la accesibilidad a los distintos sitios de muestreo. Dicha red cuenta con puntos de muestreo de agua superficial en distintos sectores de las lagunas, de agua subterránea freática adyacentes a las lagunas correspondientes a pozos someros y molinos (que captan a 2m y ≈15m de profundidad respectivamente) y de agua subterránea surgente. In situ se midió el pH y la conductividad eléctrica del agua y se extrajeron muestras para la determinación del contenido de iones mayoritarios. Los resultados obtenidos muestran que las lagunas presentaron conductividades eléctricas entre 143 y 158 mS/cm (indicativas de aguas hipersalinas) y valores de pH entre 7,9 y 8,8, con facies hidroquímicas Cl-Na. Por su parte, las muestras de agua subterránea registraron conductividades eléctricas entre 0,909 y 155 mS/cm, pH entre 6,8 y 8,7 y facies hidroquímicas HCO_3 a Cl/SO_4-Na en molinos, Cl/SO_4-Na en pozos surgentes y Cl-Na en pozos someros. Se concluye que la afinidad en la señal hidroquímica de los pozos surgentes con los del agua superficial y subterránea somera del humedal da indicios de la existencia de contribuciones desde flujos regionales, los cuales no solo aportan caudal sino también iones que condicionan las características ambientales del humedal.

Palabras Clave: Ambientes salinos, Iones mayoritarios, Cubetas de Deflación.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca de Macachín se encuentra ubicada en el sector central de la Llanura Pampeana, en el noreste de la provincia de La Pampa y parte del oeste de la provincia de Buenos Aires (ver Fig. 1) (Yrigoyen, 1975; Folguera y Zárate, 2019). La misma tiene forma en planta elongada en sentido NNW-SSE y un relleno sedimentario de aproximadamente 4000 metros apoyados en discordancia sobre el basamento Paleozoico (Salso, 1966). Aflorantes en el área de estudio (ver Fig. 1) se encuentran los sedimentos loessicos castaño rojizos correspondientes a la Fm. Cerro Azul y equivalentes (Mioceno superior –

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Plioceno) (Llambías 1975; Folguera y Zárate, 2009) y por encima de ellos, culminando la secuencia estratigráfica, afloran arenas y limos arenosos eólicos cuaternarios (Pleistoceno tardío – Holoceno) (Folguera y Zárate, 2018).

El sector centro-sur de la Cuenca de Macachín se encuentra atravesado por valles transversales que disectan a la planicie estructural (Lorenzo et al., 2013), uno de los cuales es conocido como Valle Maracó – Grande. El extremo terminal oriental del mismo, ubicado en el oeste de la provincia de Buenos Aires, presenta depresiones asociadas a cubetas de deflación que albergan humedales salinos e hipersalinos.

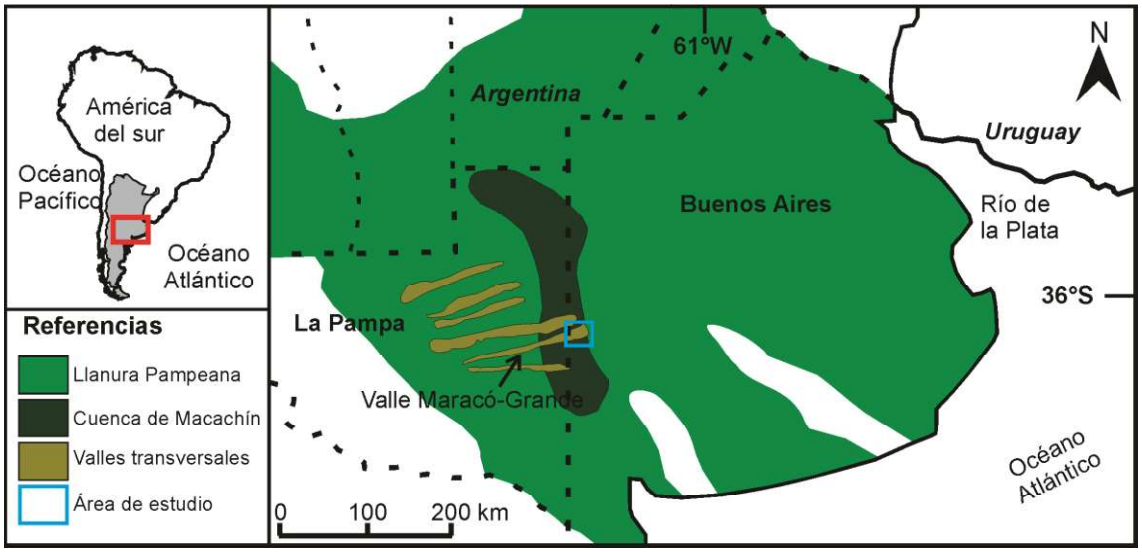


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización hidroquímica del agua superficial y subterránea de 3 humedales lagunares que se desarrollan en la parte terminal del Valle Maracó – Grande.

MÉTODOS

En una primera instancia se definió una red de monitoreo conformada por puntos de muestreo de agua superficial en tres lagunas seleccionadas y de agua subterránea circundante a las mismas (ver Fig. 2), en base a las características geomorfológicas de la región y a la accesibilidad del área. Las muestras de agua superficial se tomaron directamente de los humedales lagunares con botellas de polipropileno. Por su parte, los muestreos de agua subterránea se efectuaron en pozos someros de hasta 1,5 m de profundidad construidos con barreno manual dentro de los humedales (freatímetros), y en perforaciones preexistentes ubicadas en el área de planicie estructural elevada adyacente a los mismos. Dentro de estas últimas, se tomaron muestras de molinos, que captan a aproximadamente 15 m de profundidad, y de pozos surgentes profundos (ver Fig. 3a y b).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

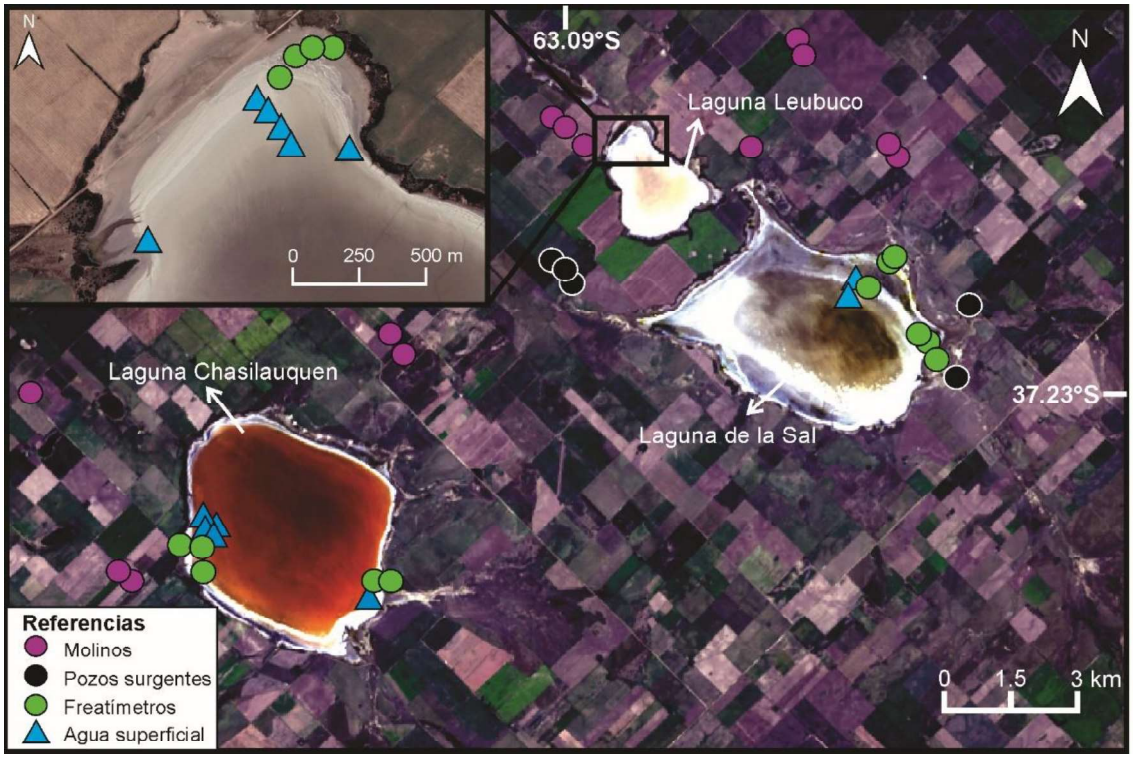


Figura 2. Ubicación de los puntos de muestreo de agua superficial y subterránea.

Se tomó un total de 46 muestras, de las cuales 13 corresponden a molinos, 5 a pozos surgentes, 15 a freatímetros y 13 a agua superficial de las lagunas. *In situ* se midió el pH y la conductividad eléctrica (CE) del agua con un equipo multiparamétrico portátil (Lutron WA-2017SD) (ver Fig. 3c). En el laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Geológicas se llevó a cabo la determinación de los iones mayoritarios (ver Fig. 3d) según métodos estandarizados (APHA, 1997). Los datos presentados en este trabajo corresponden a un muestreo realizado en Febrero 2022. Carbonato (CO_3^{-2}), bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}) fueron determinados por titulación. Sodio (Na^+) y potasio (K^+) por fotometría de llama, mientras que sulfato (SO_4^{-2}) fue medido por espectrofotometría UV-Visible. Los datos químicos se analizaron mediante el diagrama de Piper utilizando el software SigmaPlot 12.0.



Figura 3. a. Toma de muestras de agua subterránea de molinos. **b.** Freatímetro para tomar muestras de agua subterránea somera. **c.** Medición de parámetros *in situ*. **d.** Determinación de iones mayoritarios en laboratorio; técnica de titulación.

RESULTADOS

Los valores de pH para las tres lagunas analizadas varían entre 7,87 y 9,01 mientras que la CE varía entre 143 y 158 mS/cm, siendo estos valores indicativos de aguas hipersalinas. Por su parte, el agua tomada de los freatímetros realizados dentro de los humedales cuenta con pH entre 6,83 y 8,71 y CE que varían entre 33,90 y 157 mS/cm (aguas salinas a hipersalinas), aumentando los valores desde la periferia del humedal hacia la laguna. Dentro de la planicie estructural, las muestras tomadas de pozos surgentes profundos presentaron valores de pH entre 7,27 y 8,70 y valores de CE homogéneos, dentro del rango de 4,40 y 5,06 mS/cm (aguas salobres) y los molinos pH entre 7,36 y 8,29 registrando las menores CE con valores entre 0,90 y 3,80 mS/cm (aguas dulces a salobres).

El agua superficial presenta un carácter hidroquímico Na-Cl (ver Fig. 4) en donde el Cl^- es el anión dominante en todas las muestras (3773 a 6463 meq/L), seguido por el SO_4^{-2} (534 a 1145 meq/L) y con valores muy bajos de $HCO_3^- + CO_3^{-2}$ (7 a 36 meq/L). En cuanto a los cationes, el Na^+ es el que domina con valores mínimos de 3479 y máximos de 6089 meq/L. Los cationes restantes presentan concentraciones que oscilan entre 105 y 1284 meq/L, 0,02 y 4,95 meq/L y 8,71 y 22,7 meq/L para Mg^{+2}, Ca^{+2} y K^+ respectivamente. El agua subterránea somera dentro del humedal presenta facies del mismo tipo (Na-Cl), pero con concentraciones iónicas menores. El Cl^- varía entre 291 y 4702 meq/L y el SO_4^{-2} entre los 148 y 870 meq/L, siendo estos los aniones más abundantes acompañados por concentraciones de $HCO_3^- + CO_3^{-2}$ de 6,20 a 32 meq/L. En lo que respecta a los cationes, nuevamente el Na^+ es el más abundante (456 a 4023 meq/L) seguido por el Mg^{+2} (60 a 1129 meq/L), con bajas concentraciones de Ca^{+2} (0,05 a 25 meq/L) y K^+ (0,90 a 24,30 meq/L).

Por otro lado, dentro de la planicie estructural, las muestras correspondientes a los pozos surgentes tienen un carácter hidroquímico Cl/SO_4-Na, mientras que los molinos son los que más variabilidad presentan con respecto a los aniones, con facies desde HCO_3-Na a Cl/SO_4-Na. Las concentraciones iónicas correspondientes a los pozos surgentes presentan poca variabilidad. Dentro de los aniones el Cl^- varía entre 30,41 y 22,1 meq/L y el SO_4^{-2} lo hace entre 34,30 y 6,11 meq/L mientras que las concentraciones de $HCO_3^- + CO_3^{-2}$ son muy bajas (3 a 4,70 meq/L). El Na^+ es el catión dominante en todas estas muestras, alcanzando valores de 44,3 meq/L. Lo sigue el Mg^{+2}, con un rango de 0,70 a 10,2 meq/L, el Ca^{+2} (0,19 a 3,50 meq/L) y el K^+ (0,15 a 0,22 meq/L). Por último, en las muestras de agua tomadas de molinos existen concentraciones variables sobre todo considerando a los aniones. El Cl^- varía entre 1,06 y 16,82 meq/L y el SO_4^{-2} entre 0,57 y 22,91 meq/L. A diferencia de las demás muestras, en este grupo el $HCO_3^-+CO_3^{-2}$ está en concentraciones similares al cloruro y al sulfato, con valores que rondan entre 5,20 y 18,10 meq/L. En cuanto a los cationes, no hay prácticamente variabilidad, y al igual que en todas las demás muestras, el catión dominante es el Na^+ con valores de 7,11 a 36,10 meq/L, presentando concentraciones variables de Mg^{+2} (1,92 a 12,90 meq/L) y Ca^{+2} (0,22 a 4,71 meq/L), y muy bajas de K^+ (0,06 a 0,17 meq/L).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

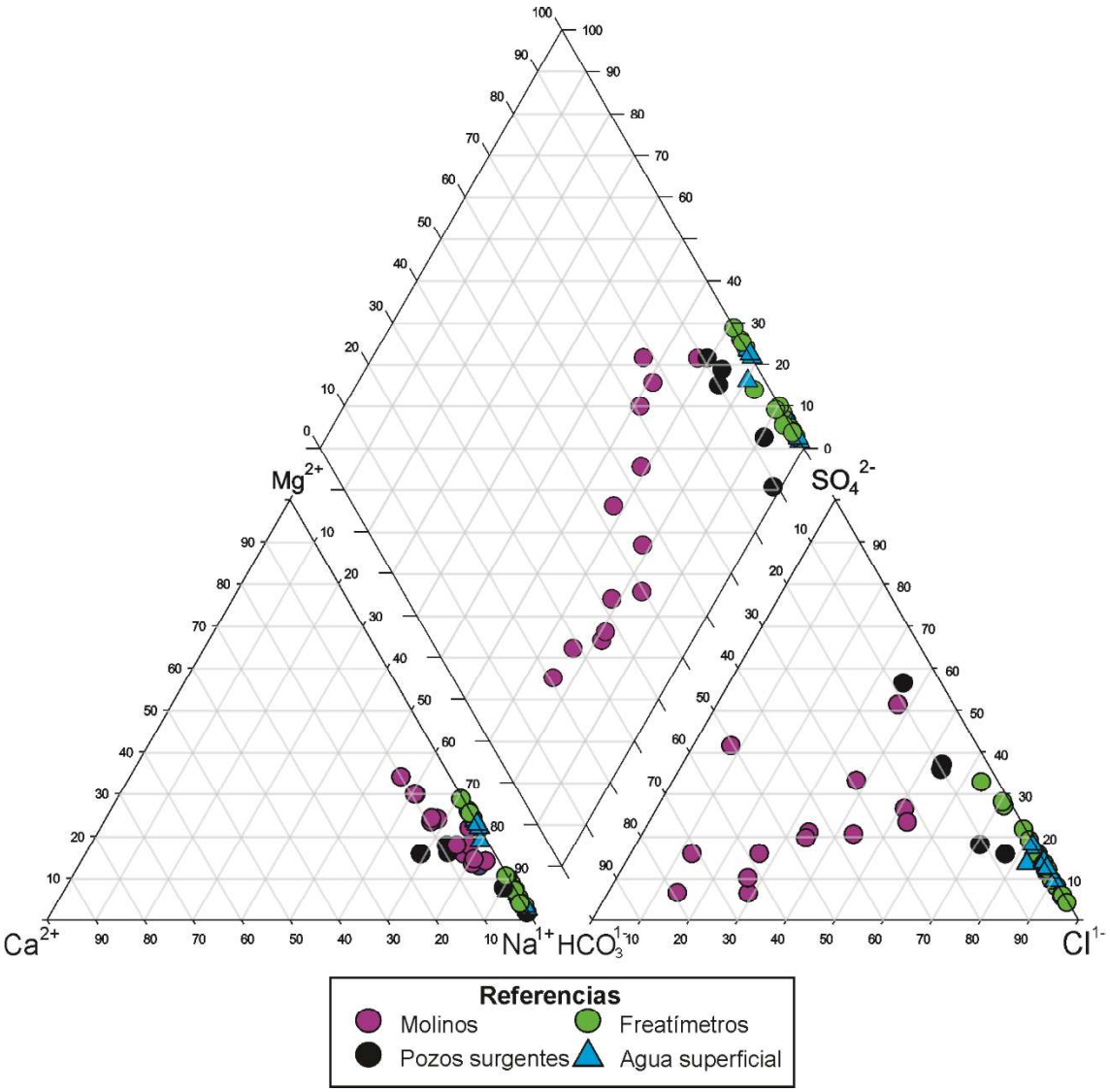


Figura 4. Diagrama de Piper mostrando las concentraciones en porcentaje de los cationes y aniones mayoritarios.

CONCLUSIONES

El agua superficial de las lagunas presentó facies hidroquímicas Na-Cl, con un carácter hipersalino, mientras que, el agua subterránea presentó diferentes facies hidroquímicas y salinidades según la ubicación geomorfológica y la profundidad de extracción. Por un lado, las muestras subterráneas someras dentro del humedal presentaron facies iguales a las lagunas (Na-Cl), con CE indicativas de aguas salinas a hipersalinas. En el sector de planicie estructural, en las muestras de pozos surgentes profundos las facies son Cl/SO_4-Na y son salobres, mientras que en las muestras tomadas de molinos, que captan a profundidades intermedias entre los surgentes y las subterráneas someras del humedal, existe una variabilidad en las concentraciones de aniones registradas, pasando de facies HCO_3 a Cl/SO_4-Na, y CE representativas de aguas salobres a dulces. A partir de estos datos, se concluye que la afinidad en la señal hidroquímica de los pozos surgentes con los del agua superficial y subterránea somera del humedal da indicios de la existencia de contribuciones desde flujos regionales, los cuales no solo aportan caudal sino también iones que condicionan las características ambientales del humedal. Por su parte, la

 ISBN: 978-987-1323-89-0

diferencia en CE entre el agua subterránea y el agua superficial se debe a un incremento en la concentración iónica producto de la evaporación.

REFERENCIAS

APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, nineteenth ed., p. 1134 (Washington) (1997).

Folguera, A., Zárate, M. La sedimentación neógena continental en el sector extrandino de Argentina Central. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64: 692-712 (2009).

Folguera, A., Zárate, M. La estructuración miocena tardía del Bloque de La Pampa Central. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75 (1) 115-133 (2018).

Folguera, A., Zárate, M. Late oligocene to quaternary tectonic evolution of the extra Andean basins of the Pampean Plain, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences,* 94, 102207 (2019).

Llambías, E. Geología de la Provincia de La Pampa, República Argentina, y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35:87-146 (1975).

Lorenzo, F., Mehl, A., Zárate, M. Sedimentología y estratigrafía de depósitos del Mioceno tardío de los valles transversales de La Pampa. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis,* 20: 67-84 (2013).

Salso, J. H. La cuenca de Macachín, provincia de La Pampa. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 21: 107-117 (1965).

Yrigoyen, M. R. Geología del subsuelo y plataforma continental. *Relatorio 6° Congreso Geológico Argentino:* 139-168 (1975).

HIDROQUÍMICA Y FACIES EVAPORÍTICAS EN LA LAGUNA DE CHASILAUQUEN, BUENOS AIRES, ARGENTINA

Rosario Acosta[a], Eleonora S. Carol[a], María del Pilar Alvarez[b], Francisco A. Cellone[c] y Guido E. Borzi[a]

[a]*Centro de Investigaciones Geológicas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de La Plata (CIG – CONICET – UNLP), ARGENTINA.*
[b]*Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales, Centro Nacional Patagónico, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IPEEC – CENPAT – CONICET), ARGENTINA.*
[c]*Centro de Investigaciones del Medio Ambiente, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de La Plata (CIM – CONICET – UNLP), ARGENTINA.*

e-mail: racosta@cig.museo.unlp.edu.ar

RESUMEN

Los humedales lagunares salinos e hipersalinos son ambientes que se encuentran principalmente en cuencas endorreicas de regiones áridas y semiáridas, aunque también se reconocen en regiones de clima subhúmedo. Dentro de este contexto climático y geomorfológico, existen en el oeste de la Provincia de Buenos Aires humedales salinos e hipersalinos, como lo es la laguna de Chasilauquen. En la misma, el agua es eliminada del sistema principalmente por evaporación, dando lugar a la precipitación de minerales evaporíticos. El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización hidroquímica de la laguna e identificar los minerales que se forman producto de la evaporación del agua. La relación entre precipitación y evapotranspiración se determinó a partir de balances hídricos para el período 2011-2021. Se muestreó el agua superficial en distintos sectores de la laguna y se tomaron muestras de precipitados evaporíticos dentro y en los márgenes de la laguna. In situ se midió la conductividad eléctrica y el pH de las muestras de agua, con un equipo multiparamétrico, y en laboratorio la concentración de iones mayoritarios. La mineralogía de las muestras de sales fue determinada a través de la observación en microscopio electrónico de barrido con EDAX. El balance hídrico evidencia que la evapotranspiración media potencial es de 784,5 mm y supera a las precipitaciones medias anuales (709 mm). La laguna presentó valores de conductividad eléctrica entre 143 y 158 mS/cm y un carácter hidroquímico clorurado sódico. La evaporación del agua de la laguna da lugar a la formación de cloruros y sulfatos de sodio de tipo thenardita y halita desarrollándose generalmente la thenardita por sobre los cristales de halita. Las observaciones de campo muestran que esta precipitación de minerales ocurre antes de la evaporación total, registrándose estos también en los sectores en donde la laguna presenta una lámina somera de agua.

Palabras Clave: Evaporitas, Lagunas Endorreicas, Humedales hipersalinos.

INTRODUCCIÓN

Los humedales lagunares salinos e hipersalinos son ambientes que se encuentran principalmente en cuencas endorreicas de regiones áridas, semiáridas y subhúmedas (Canevari et al., 1999; Yechieli y Wood, 2002; Jones y Deocampo, 2003). Dentro de este contexto climático y geomorfológico existen en el oeste de la Provincia de Buenos Aires humedales salinos e hipersalinos, algunos de los cuales conforman salinas con potencial económico (SEGEMAR UNSAM 2003; Alonso, 2006). Un ejemplo es el caso de la laguna de Chasilauquen (ver Fig. 1) la cual se aloja en una cubeta endorreica dentro de

 ISBN: 978-987-1323-89-0

un ambiente geomorfológico mayor asociado a planicies elevadas y valles transversales. Dentro de ella la lámina de agua somera es evaporada debido a la elevada tasa de evaporación dando lugar a la precipitación de distintos minerales evaporíticos (Guido et al., 1998). El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización hidroquímica de la laguna e identificar los minerales que se forman producto de la evaporación del agua superficial.

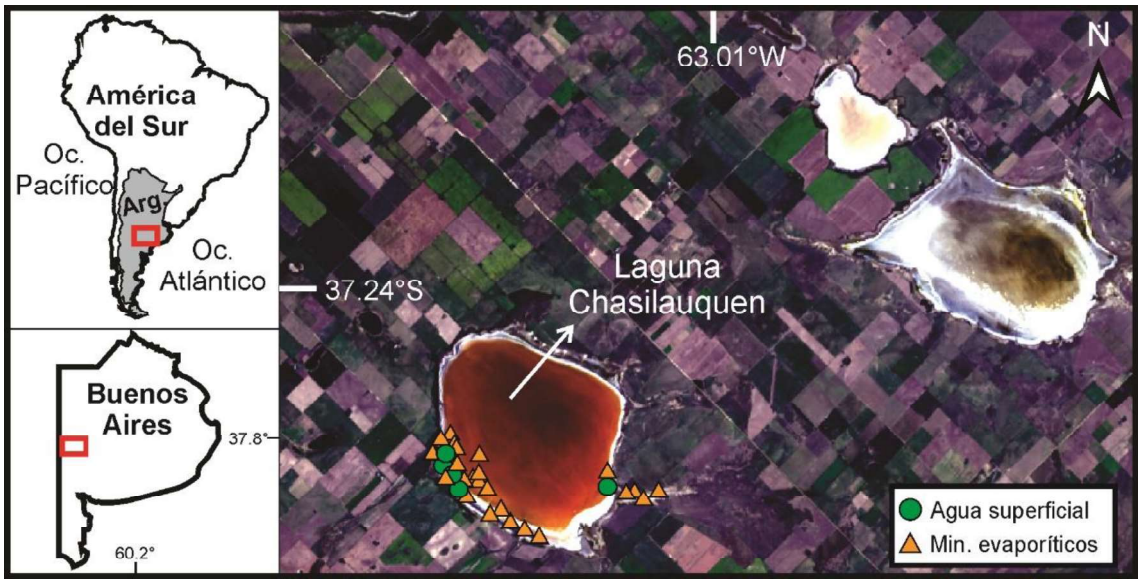


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de los puntos de muestreo de agua superficial y de precipitados evaporíticos.

MÉTODOS

En primer lugar, se analizaron datos de temperatura y precipitaciones registrados por la estación meteorológica Bordenave EMC con ubicación -37,84° latitud y -63,02° longitud, correspondiente a la base de datos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2022). Es importante resaltar que, si bien dicha estación no se encuentra dentro del área de estudio, está próxima a la misma y posee una serie completa de datos, no encontrando ninguna de esas características dentro del área en cuestión. Se confeccionaron balances hídricos mensuales para la década 2011 – 2021 utilizando el método de Thornthwaite y Mater (1957) para analizar la relación entre la evapotranspiración y la precipitación.

A su vez, se generó una red de monitoreo para tomar muestras de agua superficial de la laguna y muestras de precipitados evaporíticos dentro y en los márgenes de la misma. El pH y la conductividad eléctrica (CE) del agua fue medido *in situ* con un equipo multiparamétrico portátil (Lutron WA-2017SD). Luego se tomaron muestras para el análisis de iones mayoritarios según métodos estandarizados (APHA, 1998) en el laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Geológicas (CIG). Los datos presentados corresponden a un muestreo realizado en Febrero 2022. Carbonato (CO_3^{-2}), bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}) fueron determinados por titulación. Sodio (Na^+) y potasio (K^+) por fotometría de llama y sulfato (SO_4^{-2}) y nitrato (NO_3^-) por espectrofotometría UV-Visible. Los datos químicos fueron procesados utilizando el software Diagrammes (Simler, 2009) para graficar los diagramas de Stiff

 ISBN: 978-987-1323-89-0

(1951). Esta información fue volcada en un sistema de información geográfica (QGIS 3.16.5) para analizar espacialmente la química del agua.

Por su parte, la mineralogía de las muestras de precipitados evaporíticos fue determinada a través de la observación en microscopio electrónico de barrido con EDAX (Zeiss Sigma 300 VP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El balance hídrico (ver Fig. 2) realizado para la década 2011-2021 evidencia que la evapotranspiración potencial media mensual supera a la precipitación media mensual en la mitad de los meses del año, siendo la diferencia entre ambas considerable en verano. Los meses más húmedos fueron octubre y abril con precipitaciones de más de 90 mm y los más secos junio y julio con 20 mm. Por su parte, las mayores temperaturas medias fueron registradas en enero (23,6°C) y las menores en junio y julio con 7,1°C. A su vez, a lo largo de la década, la evapotranspiración media anual es de 784,5 mm, y supera a las precipitaciones medias anuales que alcanzan valores de 709 mm.

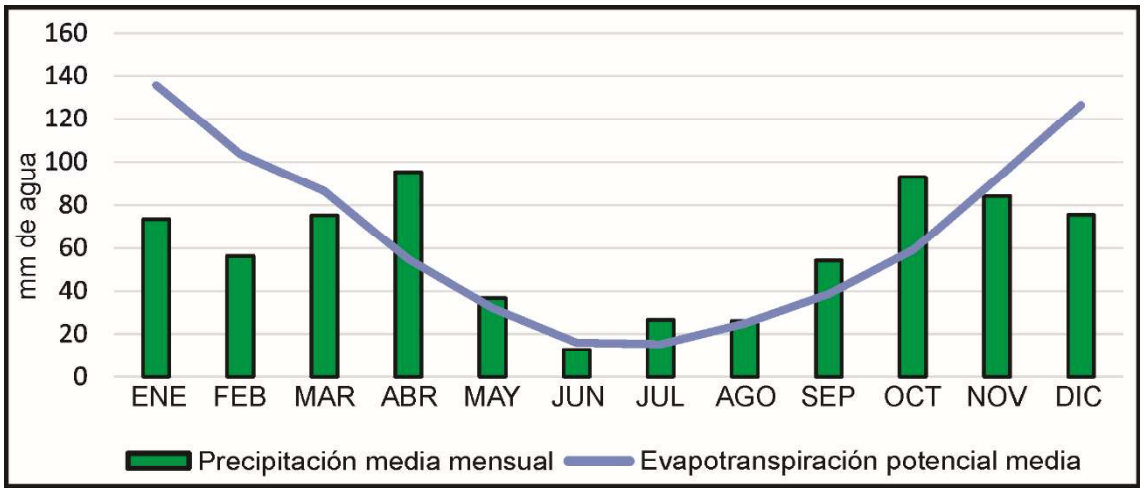


Figura 2. Balance hídrico mensual para la década 2011 – 2021.

Las muestras de agua de la Laguna Chasilauquen presentaron valores de CE entre 148 y 158 mS/cm, que son indicativas de ambientes hipersalinos, y pH entre 8,08 y 8,7, no habiendo sustanciales diferencias entre los distintos puntos de muestreo dentro de la laguna (ver Tabla I).

En la Fig. 3 es posible observar los diagramas Stiff para las muestras de agua superficial, que evidencian que no existen variaciones tanto en las facies químicas como en las concentraciones iónicas dentro de la laguna. Los mismos presentan un marcado carácter hidroquímico clorurado sódico, superando la concentración de estos iones ampliamente a la del resto en todas las muestras, con valores que oscilan entre 5199 a 6463 meq/L para el cloruro y entre 5698 y 6089 meq/L para el sodio. Por otro lado, se registraron bajos valores de potasio (entre 16,11 y 17,9 meq/L), carbonato (entre 7,92 y 20,16 meq/L) y bicarbonato (entre 6,8 y 11,8 meq/L), valores casi imperceptibles de calcio y nitrato (entre 0,99 y 1,13 meq/L y 0,9 y 1,14 meq/L respectivamente) y valores intermedios de magnesio y sulfato (entre 320 y 389 meq/L para el magnesio y 687 y 1145 meq/L para el sulfato).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Tabla I. pH y CE de las muestras de agua superficial de la laguna.

Muestra de agua	pH	CE (mS/cm)
LB1	8,41	149,9
LB9	8,14	158,5
LB13	8,18	158,4
LB15	8,08	152,2
LB34	8,70	143,7

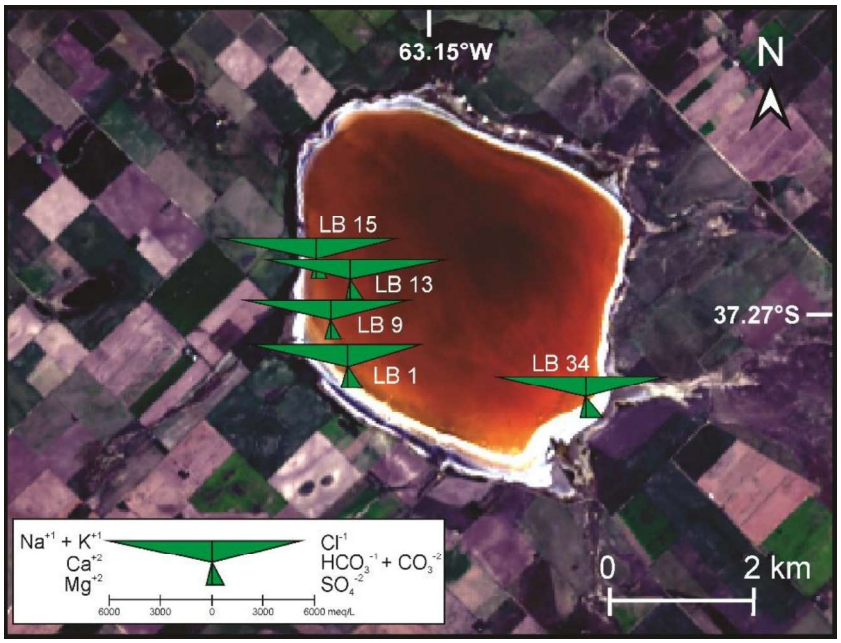


Figura 3. Facies del agua superficial de la laguna a partir de los diagramas de Stiff.

Por último, las muestras de precipitados evaporíticos analizados se encuentran formando tanto eflorescencias como costras de hasta 0,5 cm en superficie sobre los sedimentos clásticos de la laguna (ver Fig. 4a) con morfología cúbica, anhedral y prismática. Es posible encontrar precipitados monominerales (Fig. 4b) o poliminerales (Fig. 4c) en donde la parte central está compuesta dominantemente por cristales de halita y los bordes por thenardita. Los análisis del microscopio electrónico de barrido con EDAX reflejan que la mineralogía está compuesta por cloruros y sulfatos de sodio de tipo halita y thenardita respectivamente, desarrollándose generalmente la thenardita por sobre los cristales de halita (Fig. 4 d, e y f).

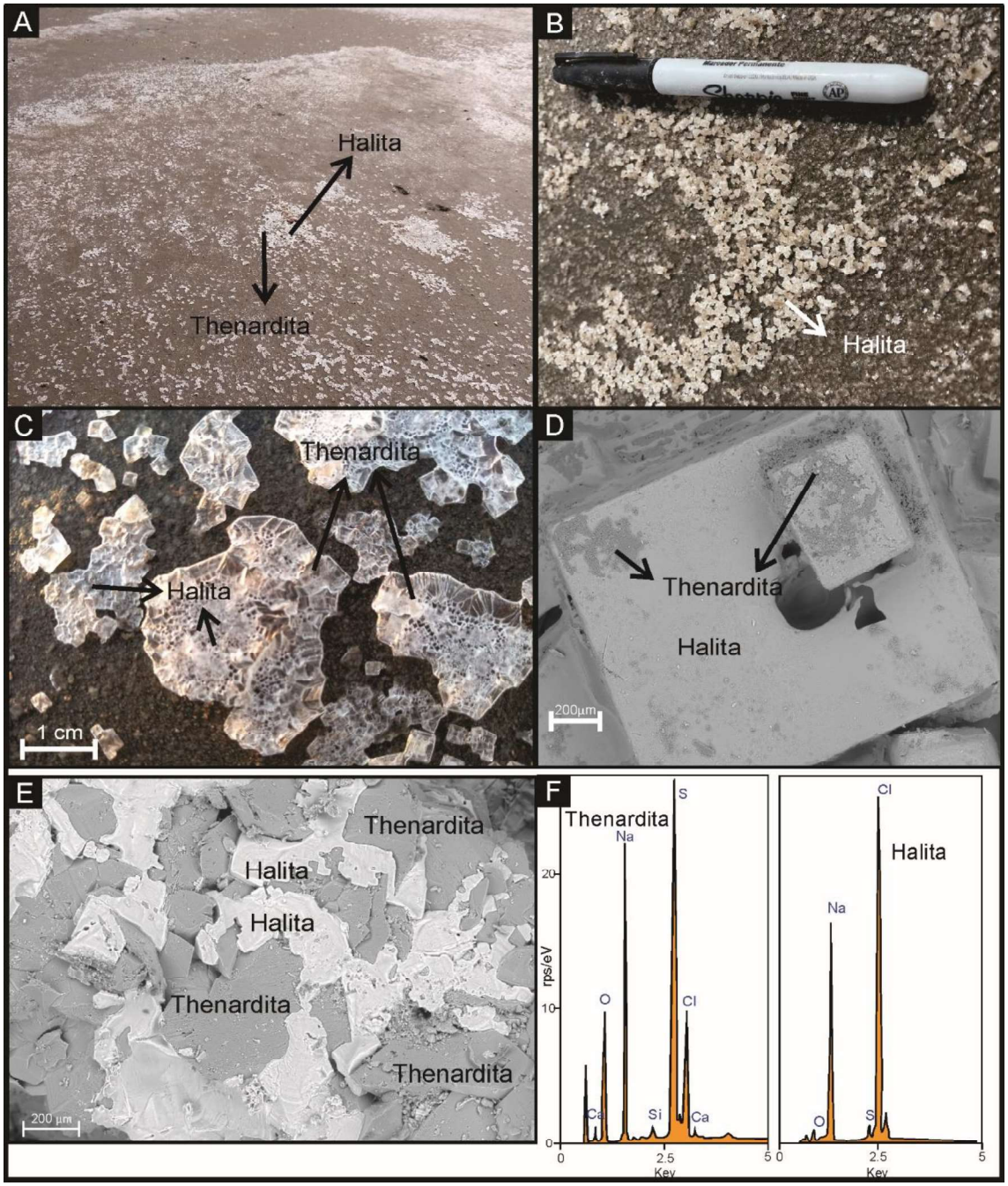


Figura 4. a. Precipitados evaporíticos sobre los sedimentos clásticos de la laguna. **b.** Precipitados monominerales de halita. **c.** Precipitados poliminerales de halita y thenardita. **d y e.** imagen de microscopio electrónico de barrido de halita y thenardita. **f.** EDAX de Thenardita y Halita.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian que la evapotranspiración media potencial superior a la precipitación media mensual en seis meses del año permite que se evapore gran parte del agua de la laguna, dando lugar a la precipitación de minerales producto de un aumento de la concentración por evaporación. Los valores de CE, pH y facies hidroquímicas fueron similares en todos los puntos de muestreo evidenciando una dominancia de condiciones hipersalinas, levemente alcalinas y facies cloruradas sódicas . Los minerales evaporíticos

presentes son cloruros (halita) y sulfatos de sodio (thenardita), los cuales precipitan por evaporación, siendo estos los iones más abundantes en el agua de la laguna.

REFERENCIAS

Alonso, R. N. Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina. INSUGEO; Serie de Correlación Geológica, 21: 12-2006; 155-170, (2006).

APHA. American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, twentieth ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC. (1998).

Canervari, P., Blanco, D. E., Bucher, E. Los beneficios de los humedales de la Argentina. Amenazas y propuestas de soluciones. Wetlands International, 1999.

Guido, D., de Barrio, R., Del Blanco, M., Tessone, M. Geología y geoquímica de la sulfatera Chasilauquen, partido de Adolfo Alsina, Provincia de Buenos Aires. *5° Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Actas,* 1: 217-224, Mar del Plata (1998).

Jones, B. F., y Deocampo, D.M. Geochemistry of saline lakes. J.I. Drever (Ed.), Treatise on Geochemistry: Surface and Groundwater, Weathering and Soils, 5: 365-392 (2003).

INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico del INTA. http://siga.inta.gob.ar/#/ (2022).

SEGEMAR-UNSAM. Sales. Publicación técnica del SEGEMAR – UNSAM N9. ISSNN03295230, (2003).

Simler, R. Diagrammes: Logiciel d'hydrochimie multilangage en distribution libre. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. Versión 6.59. (2009).

Stiff, H. A. the interpretation of chemical water analysis by means of pattern. Journal of Petrol Technol 3(10): 15-17 (1951).

Thornthwaite, C. W., and Mather, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publication in Climatology, 10: 185-311 (1957).

Yechieli, Y., Wood, W. W. Hydrogeologic processes in saline systems: playas, sabkhas and saline lakes. Earth Science Reviews, 58: 343-365 (2002).

DINÁMICA DEL FÓSFORO EN AMBIENTES FLUVIALES AFECTADOS POR DISTINTAS ACTIVIDADES ANTRÓPICAS

Débora N. Alfaro[a], Eleonora Carol[b], María del P. Alvarez[c]

[a]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b]*Centro de Investigaciones Geológicas (CONICET- UNLP)*
[c]*Instituto patagónico para el estudio del los ecosistemas continentales (CENPAT- CONICET)*

e-mail: deboralfaro@gmail.com

RESUMEN

El aumento en las concentraciones de fósforo en ambientes fluviales asociado a fuentes antrópicas constituye una problemática ambiental en todo el mundo. El objetivo del trabajo fue estudiar la relación entre las actividades antrópicas y las variaciones en los contenidos de fósforo en el agua y sedimentos del cauce del Arroyo Salado en el área de General La Madrid (Buenos Aires, Argentina). Para ello se efectuó una identificación de los distintos usos del suelo asociados a un tramo de 13 km del arroyo. Posteriormente se definieron 12 puntos de muestreo de agua superficial y sedimentos del cauce los que se muestrearon en diferentes condiciones hidrológicas. El contenido de fósforo soluble (PS) y fósforo total (PT) en agua y de P biodisponible en sedimentos se determinó por métodos estandarizados. Los resultados obtenidos muestran que el fósforo se concentra mayormente en los sedimentos del cauce, comportamiento que se debe a su afinidad geoquímica por ser retenido en la fase sólida. Asimismo, se observó que las mayores concentraciones ocurren en zonas antrópicamente modificadas del cauce con terraplenes, puentes o cementación. Por su parte, la distribución del fósforo en el agua varió respecto al uso del suelo, registrándose los mayores contenidos de PS y PT donde el uso del suelo es ganadero o hay disposición de residuos domiciliarios, seguidos por el sector agrícola y por último el recreativo. En los puntos de mayor concentración se observó la presencia de algas, las que indicarían procesos de eutrofización, los cuales se acentúan en períodos de déficit hídrico cuando el agua tiende a estancarse. Luego de un evento de precipitación, la concentración de PS y PT tiende a disminuir en los sectores ganaderos y aumentar en los agrícolas, pudiendo asociarse este último a arrastre de fertilizantes con el escurrimiento no encauzado desde las áreas cultivadas.

Palabras Clave: Nutrientes, Cuenca de llanura, Usos del Suelo.

INTRODUCCIÓN

El fósforo es uno de los nutrientes esenciales en ambientes fluviales (Hobbie et al, 2017), no obstante el incremento en su concentración en el agua de los ríos como producto de actividades antropogénicas puede resultar en cambios en las comunidades de algas que producen un deterioro en la calidad del agua (Dalu et al, 2017). Los distintos usos del suelo pueden generar diferentes impactos en los ambientes fluviales (Hill, 1981; Harding et al, 1999; McDowell et al, 2002). Las actividades ganaderas intensivas desarrolladas en las adyacencias de los ríos generan grandes cantidades de materia orgánica que ingresan al curso con la escorrentía superficial, constituyendo fuentes que aportan fósforo a los cursos fluviales bajo formas orgánicas o solubles. Asimismo, dado que su ingreso a los cursos fluviales está relacionado en gran medida al transporte de sedimentos y de compuestos en solución durante los eventos de lluvia, las concentraciones en los ríos pueden variar en función de las condiciones hidrológicas (House y Warwick, 1998;

Jordan-Meille et al, 1998). Estudiar la concentración de nutrientes tales como fósforo en el agua y sedimentos de cursos fluviales permite evaluar la capacidad natural de retención de nutrientes de un sistema fluvial (Dalu et al, 2017; Dalu et al, 2019).
En la llanura Interserrana de la provincia de Buenos Aires se desarrolla un conjunto de arroyos que drenan hacia el noreste a zonas deprimidas lagunares y/o a la cuenca del río Salado. El arroyo Salado constituye uno de estos cursos, el cual nace en la localidad de Laprida y atraviesa el partido de General La Madrid de este a norte hasta desembocar en la laguna Pay Lauquen, ubicada en el sur de Bolívar (Fig. 1). En el tramo que recorre dentro del partido de General La Madrid atraviesa la zona de la localidad capital de dicho partido, desarrollándose en sus márgenes distintas actividades antrópicas.

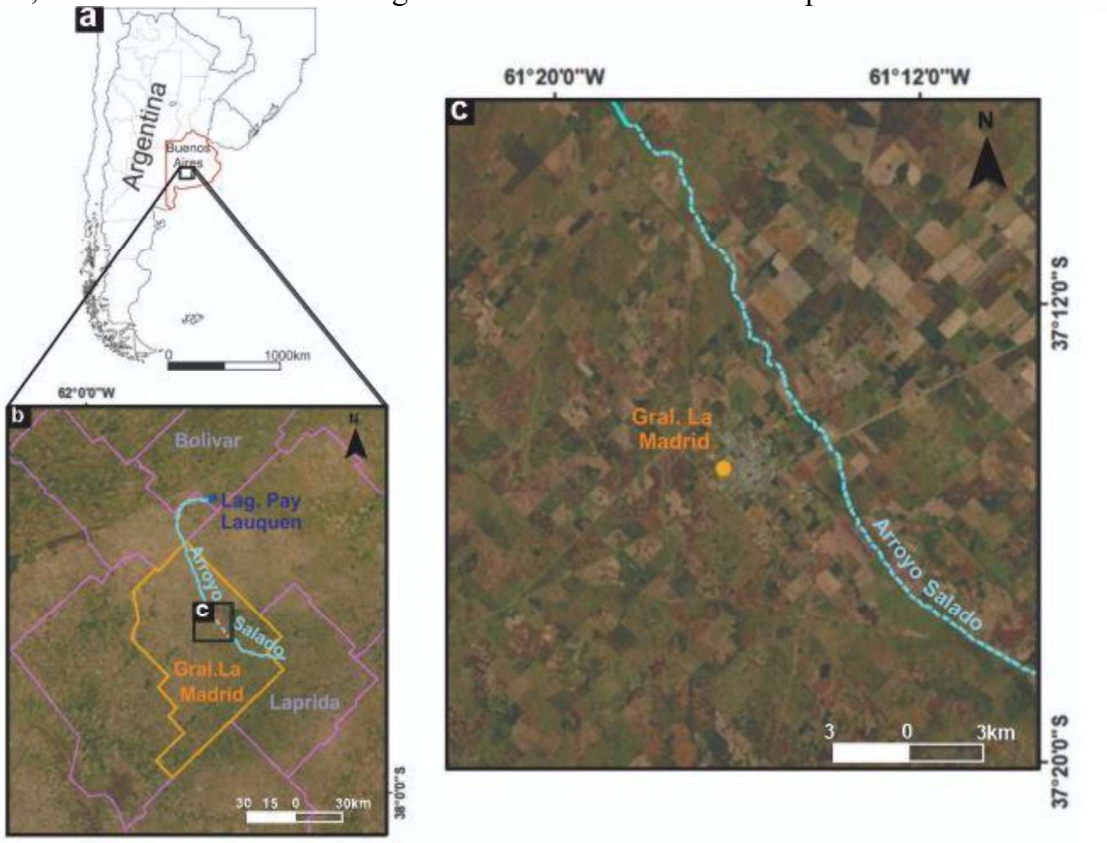


Figura 1a. Provincia de Buenos Aires, Argentina. b: partido de General La Madrid y Arroyo Salado. c: ciudad de Gral. La Madrid y tramo del arroyo Salado.

El objetivo general de este trabajo es evaluar la dinámica del fósforo en ambientes fluviales tomando como caso de estudio un sector del curso del arroyo Salado comprendido en el Partido de General La Madrid (Buenos Aires), en cuyo margen se desarrollan distintas actividades agrícolas, ganaderas intensivas y recreativas.

MÉTODO

Se efectuó una caracterización geohidrológica de la cuenca del arroyo Salado a partir del análisis de información antecedente, del análisis de imágenes satelitales (Google Earth Images ©2020 – CNES/Airbus) y de relevamientos de campo.

A partir de los datos de precipitaciones procedentes del Aeródromo de Azul (Estación Azul Aero) se efectuó un análisis de las precipitaciones anuales y mensuales para el periodo 2006 – 2021. Asimismo, se efectuaron los balances hídricos mensuales calculando la evapotranspiración potencial (ETP) mensual y anual mediante el método de Thornthwaite y Mather (1955).

Por su parte, para el periodo muestreado se efectuaron balances hídricos diarios seriados utilizando el software Balshort 3.0 desde enero del 2020 a enero del 2021 a fin de determinar las condiciones hidrológicas y relacionar los déficit y excesos de agua en los momentos de muestreo. Para esto se usaron los datos de precipitaciones procedentes de la Sociedad Rural de General La Madrid.
En base al análisis de imágenes satelitales y relevamientos de campo se identificaron los usos del suelo que se le dan a las márgenes del tramo de estudio del Arroyo Salado, éstos son: agrícola, ganadero, recreativo y de disposición de residuos domésticos (Fig. 2).

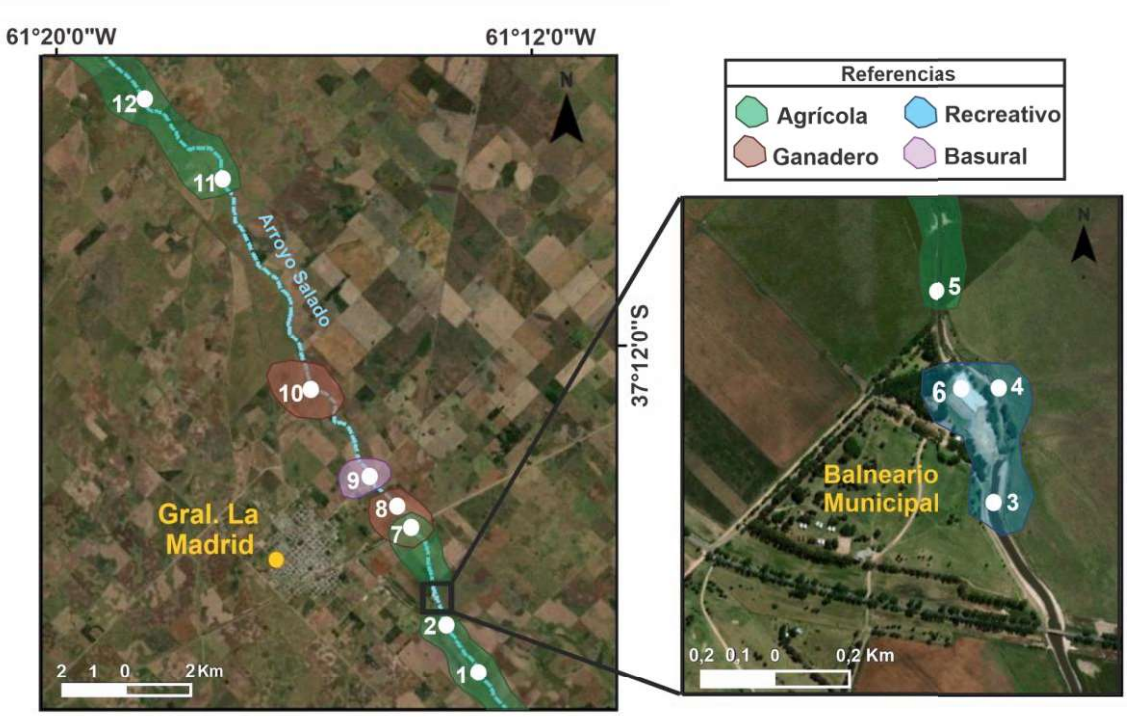


Figura 2. Concentración de P biodisponible en los sedimentos del cauce del arroyo en los distintos puntos de muestreo.

En base a las características geohidrológicas del área de estudio y a la accesibilidad se definió una red de monitoreo que abarca un tramo del arroyo de 13 km. La misma cuenta con 12 puntos de muestreo (Fig. 3).

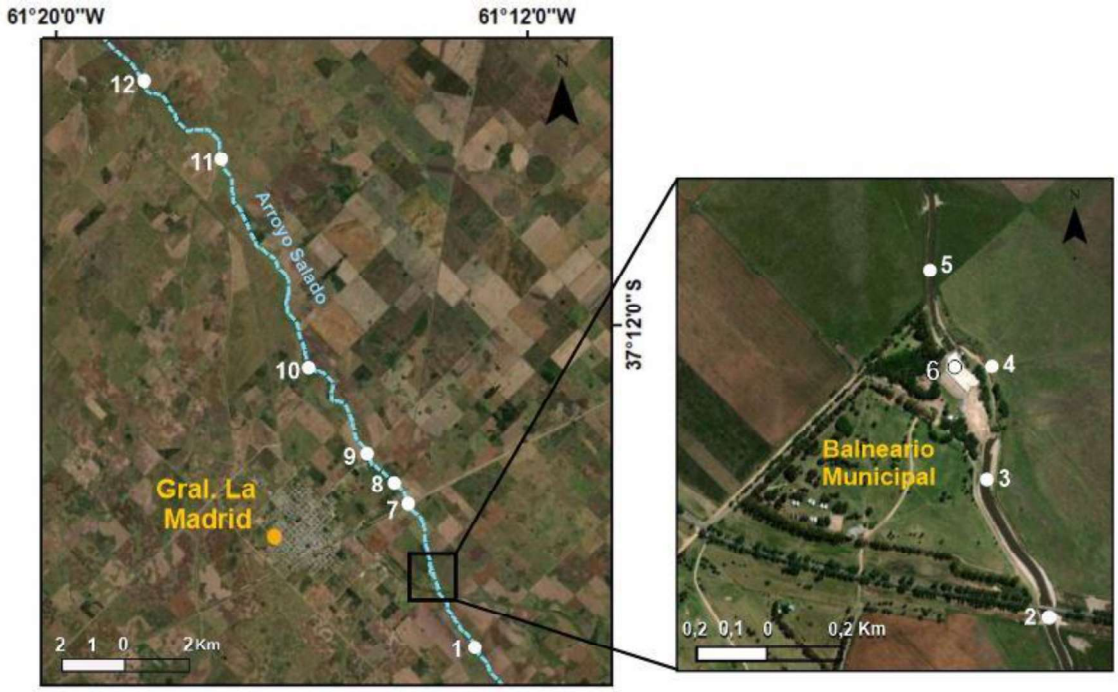


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo

El muestreo se realizó en dos etapas. En la primera, llevada a cabo entre los días 25 de diciembre del 2020 y el 4 de enero del 2021, se tomaron muestras de agua y sedimentos en todos los puntos de muestreo bajo condiciones hídricas semejantes. Durante esos días las precipitaciones fueron inferiores a 25 mm (dato aportado por la Sociedad Rural de General La Madrid), la evapotranspiración fue de entre 1,8 y 3,4 mm, las reservas de agua en el suelo fueron de entre 40 y 70 mm y no ocurrieron excesos de agua en el balance hídrico (ver balance diario en resultados). Entre los días 5 y 6 de enero se registró un evento de precipitación de 140 mm (dato aportado por la Sociedad Rural de General La Madrid), lo cual implicó un cambio importante en las condiciones hídricas del Arroyo Salado en la zona de estudio. Esto motivó la realización de un segundo muestreo entre los días 7 y 9 de enero de 2021 donde solo se tomaron muestras de agua y no se pudo replicar el muestreo en todos los sitios debido a la inaccesibilidad por inundación de algunos puntos. En los días correspondientes a la segunda etapa de muestreo se registró una precipitación de 30 mm, los valores de evapotranspiración fueron de 4,5 mm, las reservas de agua en el suelo de entre 84 y 100 mm y los excesos de agua en el balance hídrico de 14 mm.

Las muestras de agua superficial fueron tomadas con botellas plásticas de 500 ml, directamente del cauce del arroyo, enjuagando tres veces la botella con el agua de muestreo antes de la toma.

Las determinaciones químicas se efectuaron en el Laboratorio de Geoquímica del Centro de Investigaciones Geológicas (CONICET-UNLP) mediante métodos estandarizados (APHA, 1998). En las muestras de agua superficial se midió pH y conductividad eléctrica con un equipo multiparamétrico y se determinó el contenido de fósforo soluble (PS) y fósforo total (PT).

Por su parte, las muestras de sedimentos fueron tomadas con una pala en un sector medio entre el borde y la mitad del cauce, y transportadas en bolsas plásticas hacia el refrigerador. Todas las muestras fueron secadas al aire y molidas en mortero. En laboratorio se midió el pH, conductividad eléctrica (CE) y P biodisponible.

HIDROLOGÍA

La cuenca del arroyo Salado está orientada en sentido SSE-N, abarca una superficie de aproximadamente 3000 km^2. El diseño de la cuenca es alargado y presenta una densidad de drenaje baja. En algunos sectores el drenaje se encuentra parcialmente impedido y se forman lagunas y zonas anegadizas. El curso fluvial principal de la cuenca es el Arroyo Salado, nace en el partido de Laprida y a lo largo de su recorrido atraviesa el partido de General La Madrid para finalmente desembocar en la laguna Pay Lauquen, al sur de Bolívar (Fig. 1). Las inundaciones en este arroyo de llanura se encuentran favorecidas por las características particulares de la cuenca en la cual se desarrolla, tales como el relieve suave y las bajas pendientes.

Utilizando la clasificación climática de Koppen, General La Madrid presenta un clima templado, mesotérmico, con las mayores precipitaciones concentradas en los meses de verano.

La precipitación media anual para el período 2006 a 2021 es de 915 mm, registrándose valores de precipitación anual mínimos de 633 mm para el año 2008 y máximos de 1526 mm para el año 2012. El análisis de medias mensuales para el mismo periodo muestra que las mayores precipitaciones ocurren en verano y las menores en invierno, esto responde a un régimen pluvial de tipo atlántico. Se destacan, como valor máximo de precipitaciones medias mensuales, al mes de febrero con una media de 105 mm y como valor mínimo, al mes de julio con una media de 38 mm. El balance hídrico mensual considerando el periodo 2006-2021 muestra que entre abril y octubre domina la precipitación por la sobre la evapotranspiración, mientras que entre noviembre y marzo la evapotranspiración potencial (ETP) es mayor a la precipitación.

El balance hídrico diario considerando el periodo enero/2020-enero/2021 muestra que los excesos de agua se registraron principalmente cuando las precipitaciones superaron los 40 mm diarios. Particularmente para el primer muestreo se puede apreciar que en los dos meses previos al mismo no ocurrieron excesos de agua y que la lluvia de 140 mm ocurrida entre los días 5 y 6 de enero del 2021 ocasionó excedentes de agua de 104 mm.

RESULTADOS

pH, CE y contenido de PS y PT en el agua superficial

Análisis de los datos antes del evento de precipitación:

El agua superficial del arroyo presenta valores de pH que varían entre 8,3 y 9,6, registrándose los valores más alcalinos en M10 y M11, mientras que el valor de pH más bajo se registró en M8. Por su parte la conductividad eléctrica del agua varió de 2580 a 7850 µS/cm registrándose el valor más alto en el piletón del balneario municipal (M6) y el más bajo en M11.

Las concentraciones de fósforo soluble (PS) en el agua del arroyo varían entre 0,11 y 0,97 mg/L (Fig. 4). El PS más alto se registró en el basurero municipal (M9) seguido por su punto de muestreo más cercano (M8) con valores de 0,97 y 0,77 mg/L respectivamente. El resto de los datos de PS no superan los 0,3 mg/L (Fig. 4).

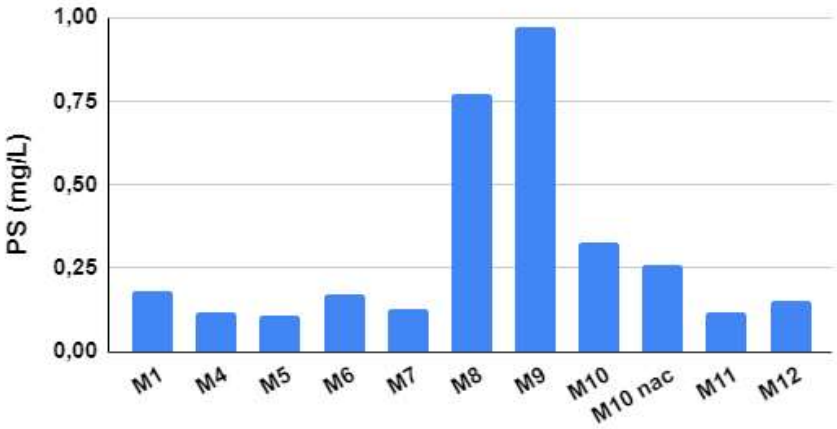


Figura 4. Concentración de PS en el agua superficial del arroyo en los distintos puntos de muestreo.

Las concentraciones de fósforo total (PT) en el agua del arroyo varían entre 0,16 y 1,22 mg/L (Fig. 5). La mayor concentración se registró en el punto asociado al basurero con un valor de 1,22 mg/L y la menor en el punto M5 (Fig. 5).

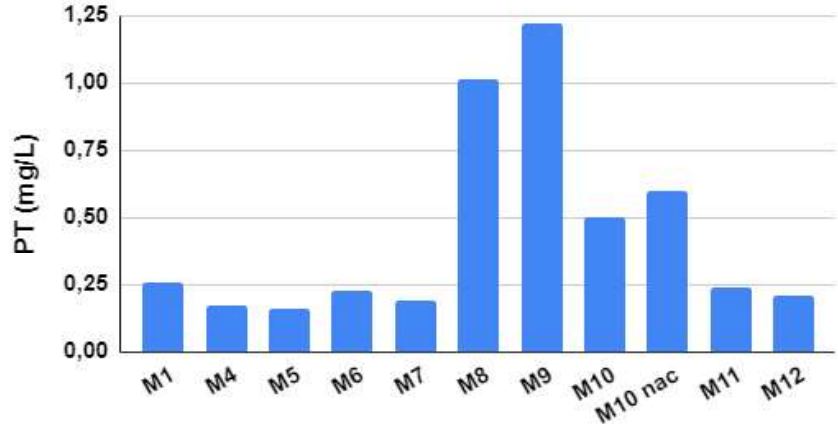


Figura 5. Concentración de PT en el agua superficial del arroyo en los distintos puntos de muestreo.

Análisis de los datos luego del evento de precipitación:

Luego del evento de precipitación el agua superficial del arroyo presenta valores de pH que varían entre 6,8 y 7,8. lo que muestra una disminución en el pH del agua respecto del muestreo precedente. El mayor valor se encontró en el piletón del Balneario Municipal; mientras que el menor valor en el punto M1. La conductividad eléctrica del agua disminuyó en todos los puntos con respecto a la primera etapa de muestreo previa a la precipitación, registrándose valores entre 104 y 327 µS/cm. En cuanto al PS, los valores aumentaron en todos los puntos que pudieron ser muestreados a excepción del punto M9 (basurero) donde su concentración disminuyó (Fig. 6). En este punto, el contenido de PS previo a la lluvia era el más alto y luego de la precipitación su concentración se asemeja al resto de los puntos de muestreo y no supera los 0,3 mg/L (Fig. 6).

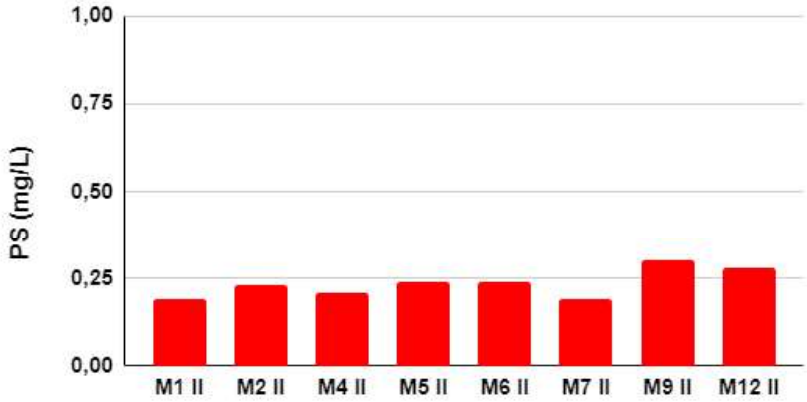


Figura 6. Concentración de PS en el agua superficial del arroyo en los distintos puntos de muestreo.

Para el PT se observó un aumento en todos los puntos de muestreo exceptuando M9 en dónde la concentración disminuyó de 1,22 a 0,5 mg/L (Fig. 7).

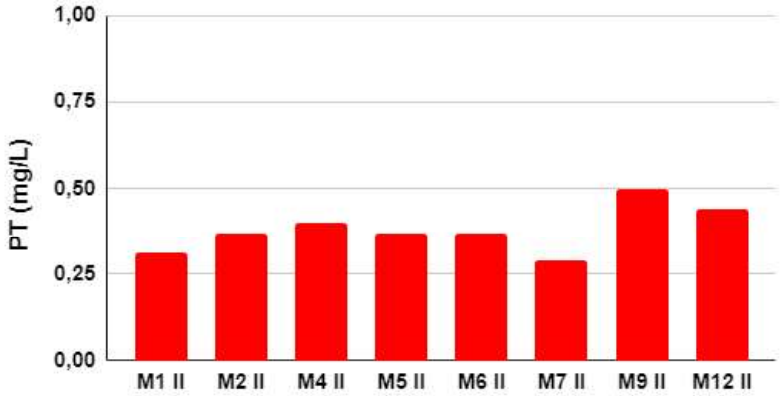


Figura 7. Concentración de PT en el agua superficial del arroyo en los distintos puntos de muestreo.

pH, CE y contenido de PS y PT en los sedimentos del cauce del arroyo

El pH medido en los sedimentos varió entre 8,69 y 10,39 registrándose el valor más alcalino en el piletón del balneario municipal. Por su parte, la conductividad eléctrica medida en los extractos de suelo varió entre 320 y 2760 µS/cm, el valor más alto se registró en el punto M12 mientras que el más bajo en M6 (piletón).
Las concentraciones de fósforo biodisponible en los sedimentos del cauce del arroyo varían entre 0,36 y 3,89 ppm (Fig. 8). Las mayores concentraciones se encontraron en M10, M7 y en los sedimentos que se depositan sobre el sector cementado del piletón del Balneario Municipal (M6 cem.). Vale mencionar que en M6 cem. la concentración de P biodisponible en sedimentos superó a la del fondo no cementado donde el valor obtenido fue de 0,36 ppm.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

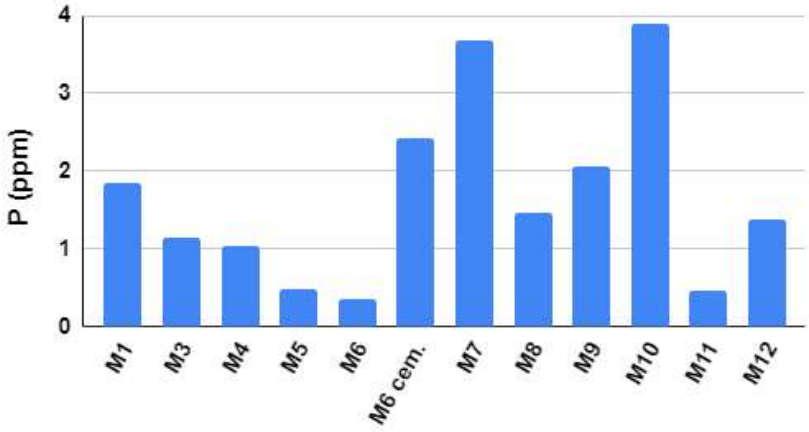


Figura 8. Concentración de P biodisponible en los sedimentos del cauce del arroyo en los distintos puntos de muestreo.

DISCUSIÓN

El análisis espacial de la dinámica del fósforo para el Arroyo Salado mostró un comportamiento diferencial relacionado a los distintos usos del suelo. Las concentraciones de PS y PT en el agua del arroyo y de P biodisponible en los sedimentos del arroyo evidencia que las mayores concentraciones se encuentran en los sectores donde el uso del suelo es ganadero. Esto es coincidente con los comportamientos registrados en otras cuencas fluviales (Menezes, 2003). En aquellos sectores dónde el uso del suelo es agrícola es menor y las concentraciones más bajas se encuentran en los sectores de uso recreativo.

Excepciones a este comportamiento general se observan en M9, M6 cem., M7 y M8. En el punto M9 el arroyo atraviesa una zona agrícola pero también se encuentra con el basurero de la ciudad. Los valores aquí obtenidos son mayores que los correspondientes a sectores agrícolas y se acercan más a los de zonas ganaderas. Este mayor aporte de nutrientes al agua asociado a la presencia de algas estaría indicando procesos de eutrofización.

Por otra parte, en los puntos donde existen modificaciones antrópicas tanto del cauce como del lecho del arroyo las concentraciones de PS, PT en agua y de P biodisponible en sedimentos son mayores a las registradas en el comportamiento general (puntos M7, M8 y M6cem.). El punto M7 es un ejemplo de esto donde la modificación del cauce ocasionó un ensanchamiento 3 veces mayor al original, esto disminuyó la velocidad del agua permitiendo la depositación de material fino, facilitando el estancamiento, la no remoción del sedimento y consecuente acumulación del fósforo.

En el punto M8 el curso del arroyo se encuentra impedido por terraplenes construidos transversalmente al cauce, en los bordes de los terraplenes el agua se encuentra estancada y con presencia de algas. Si bien es un punto de actividad ganadera que supone valores altos, la modificación del cauce por los terraplenes aporta a la causa de estos valores elevados de nutrientes que, asociados a la presencia de algas estarían indicando, al igual que en M9, procesos de eutrofización. Otro ejemplo es el sector cementado del piletón del Balneario Municipal (M6cem.), donde se acumulan sedimentos finos con valores elevados de fósforo, aún mayores que los encontrados en el Basurero Municipal. En comparación, el sector no cementado del piletón registra valores significativamente más bajos.

El evento de precipitación generó excedentes de 104 mm de agua, de los cuales un porcentaje corresponde al escurrimiento superficial, lo que ocasionó un aumento en los

caudales del arroyo. El ingreso del agua de lluvia al curso provocó un descenso en los valores de pH los cuales pasaron de ser alcalinos a ligeramente neutros.
Asimismo, el agua de lluvia diluye al agua del arroyo que se encontraba mayormente estancada en el cauce provocando un importante descenso en los valores de CE. Respecto del contenido de fósforo, luego del evento de precipitación se observó que existió un aumento tanto del PT como del PS en la mayoría de las muestras. Asimismo, se observó que el sector agrícola pasó a tener mayores concentraciones de PS y PT que el ganadero. Esto podría deberse al ingreso con el escurrimiento superficial en manto de distintas especies de P (posiblemente proveniente de fertilizantes fosforados tanto de composición orgánica como inorgánica).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el fósforo se concentra mayormente en los sedimentos del cauce respaldando el comportamiento natural de este elemento con una marcada afinidad geoquímica a ser retenido en los sedimentos del cauce, principalmente en sectores del cauce donde tienden a depositarse sedimentos finos.
Se reconoce una relación entre los usos del suelo y las concentraciones de PS y PT en el agua superficial del arroyo, así como en el contenido de P biodisponible en los sedimentos del cauce.
La actividad antrópica que aporta mayor contenido de fósforo al agua del arroyo está asociada al sector de disposición de residuos domésticos, luego a las actividades de tipo ganadera, seguido por las agrícolas y en último lugar, las recreativas.
Los valores de P biodisponibles en los sedimentos del cauce se incrementan en puntos donde el cauce fue modificado antrópicamente.
Las concentraciones de PS y PT luego de un evento de precipitación importante tienden a aumentar en los sectores agrícolas y disminuir en los ganaderos.
El mayor contenido de nutrientes fue registrado en los puntos M9 y M8 esto, asociado a la presencia de algas, estarían indicando procesos de eutrofización del cauce los cuales se acentúan en los períodos de déficit hídrico donde el agua en el cauce tiende a estancarse.

REFERENCIAS

APHA (American Public Health Association). (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, twentieth ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC (1998).

Dalu, T., Wasserman, R. J., Tonkin, J. D., Alexander, M. D., Dalu, M. T. B., Motitsoe, S., Manungo, K. I., Bepe, O., Dube, T. Water or sediment? Partitioning the role of water column and sediment chemistry as drivers of macroinvertebrate communities in an austral South African stream. Sci. Total Environ. 607–608, 317–325 (2017).

Dalu, T., Wasserman, R. J., Magoro, M. L., Froneman, P. W., Weyl, O. L. F. River nutrient water and sediment measurements inform on nutrient retention, with implications for eutrophication. Sci. Total Environ, 684: 296-302 (2019).

Harding, J. S., Young, R. G., Hayes, J. W., Shearer, K. A., Stark, J. D. Changes in agricultural intensity and river health along a river continuum. Freshwat Biol, 42(2):345-357 (1999).

Hill, A. R. Stream phosphorus and major cation mass balances for 2 rivers during low summer flows. Freshwat Biol, 12(3): 627-304 (1981).

Hobbie, S. E., Finaly, J. C., Janke, B. D., Nidzgorski, D. A., Millet, D. B., Baker, L. A. Contrasting nitrogen and phosphorus budgets in urban watersheds and implications for managing urban water pollution. Proc. Natl. Acad. Sci. 201618536 (2017).

House, W. A., Warwick, M. S. Intensive measurements of nutrient dynamics in the River Swale. Sci Total Environ, 210(1-6): 111-137 (1998).
Jordan-Meille, L., Dorioz, J. M., Mathieu, N. An artificial flood to determine the hydrological network´s contributions to phosphorus exports in a small rural watershed. Water Res, 32(6): 1801-1810 (1998).
McDowell, R.W., Sharpley, A.N., Chalmers, A.T. Land use and flow regime effects on phosphorus chemical dynamics in the fluvial sediment of the Winooski River, Vermont. *Ecol Eng, 18(4): 477-487* (2002).
Menezes, J. Calidad del agua en la microcuenca Los Hueles-Tinajones, cuenca del Canal, Panamá. Tesis Mag. Sc. Turrialba, p.74 (2003).
Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. The water balance. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Technology, Publications in climatology, Centerton, NJ, vol 8, no 1, 104 pp (1955).

APORTE DE INFORMACIÓN SATELITAL DEL SAOCOM 1 PARA EL MANEJO GANADERO EN MENDOZA EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Gustavo Alvarez [a], Nicolás Pietrelli †, Santiago Pietrelli [d], Mauricio Visciglia [d], Juan Pablo Ríos [d] Carla Bogado [c] Jaquelina Bianchini [c], Gabriela Coria [a], Laura Frulla [b], Álvaro Soldano [b], Martín Gómez [a], Adalgisa Scotti [a]

[a] *Laboratorio Bioambiental - ICES, CNEA, ARGENTINA.* [b] *CONAE, ARGENTINA.* [c] *FRSR - UTN, ARGENTINA.* [d] *Productores Ganaderos, ARGENTINA.*

e-mail: scotti@cnea.gov.ar

RESUMEN

La actividad ganadera de zonas áridas se ve amenazada por el contexto actual de cambio climático. El objetivo del proyecto es aportar información satelital para el manejo ganadero de zonas áridas y semiáridas en este contexto. Para ello se analizaron productos satelitales de dos campos piloto en la provincia de Mendoza (San Francisco y El Bagual) en tres épocas del año distintas, obtenidas de los satélites SAOCOM 1 (A y B) mediante la modelación electromagnética de las bandas polarimétricas de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) adquiridas. A partir de éstas se elaboraron mapas que indican la humedad del suelo. Para validar estas imágenes se realizaron campañas a campo en El Bagual (San Rafael) y San Francisco (Santa Rosa) en las cuales se midieron in situ datos de humedad en suelo identificando puntos específicos de espejos de agua temporarios, densidad de biomasa aérea en parcelas e identificación de la relación de gramíneas/leñosas forrajeras, seleccionando a Hyalis argentea como indicadora. Como resultado se identificaron zonas sensibles a los cambios de humedad y se tomó como indicador la reducción del área de los ramblones en el campo San Francisco. A partir del 40 % aproximadamente de reducción y con condición corporal del rodeo menor a 2 se inició una suplementación alimenticia con los ingredientes de los bloques nutricionales diseñados compuestos por: Atriplex lampa, vainas de Neltuma sp., melaza, urea, sales minerales y pellet de alfalfa. Se recolectaron muestras de orina para realizar urea/creatinina (Ur/Cr) y de materia fecal para determinar almidón, se clasificó también la materia fecal observada a corral. Los muestreos fueron realizados a algunos animales seleccionados al azar que ingresaban al corral a tomar agua, completando un total de 22 muestras en el transcurso de 5 meses. Si bien la toma de muestra fue al azar se tuvo la premisa de que los animales muestreados estén por debajo de la media del rodeo en cuanto a composición corporal. Se estimó una ingesta de suplemento de 200 – 500 g/d/a. Nuestros supuestos son: 1- el muestreo al azar en corral es representativo de la población. 2- la ingesta de alimento a corral, cuando entran a tomar agua, abarca el 60 % de los animales. 3- los parámetros bioquímicos de las muestras de orina y materia fecal permiten evaluar la suplementación alimenticia. Se concluye que: 1- las imágenes SAOCOM 1 tienen potencial para elaborar mapas predictivos de humedad del suelo indicativos del inicio de suplementación alimenticia. 2-Los ingredientes de los bloques nutricionales aportaron la ingesta calórico-proteica necesaria para el cambio de composición corporal en 1 punto. 3- La eliminación de C y N al medio fue mínima con los ingredientes aplicados. 4- La elaboración de bloques nutricionales en este tipo de esquema experimental necesita de una planta piloto de elaboración.

Palabras clave: Ganadería, SAOCOM 1, Suplementación, Cambio Climático, GEIs

† Médico Veterinario, San Rafael (1988-2022)

INTRODUCCIÓN

La ganadería de zona árida de la provincia de Mendoza es particularmente sensible a los efectos de cambio climático. De los 150.000 km^2 de superficie con la que cuenta la Provincia de Mendoza, sólo el 3% esta cultivado bajo riego, mientras que el resto de la tierra tiene en menor o mayor medida aptitud para la ganadería, correspondiendo al área de secano y campo natural, entre las isohietas de los 200 a 400 mm de lluvia. En ella se desarrolla la ganadería bovina, caprina y en menor medida la ovina. El sector ganadero es uno de los sectores pioneros en la actividad económica provincial, con un desarrollo destacado en la última década, apuntalado por la integración entre el área de secano y el área bajo riego.

La provincia de Mendoza tiene un stock total de animales de 1.555.193 cabezas. El stock está compuesto principalmente por Caprinos y Bovinos, en un 48 % y 33 % respectivamente. En menor medida por Ovinos, Equinos y Porcinos.

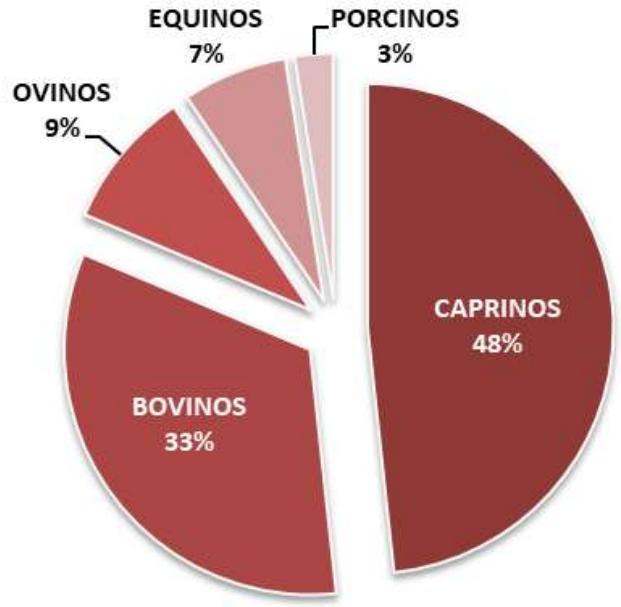


Figura 1. Composición del stock ganadero por especie. Mendoza, 2019. Fuente: Clúster Ganadero de Mendoza en base a Fundación Coprosamen y Dirección Provincial de Ganadería.

La provincia cuenta con 751 mil cabezas caprinas, 514 mil bovinos, más de 140 mil ovinos, 104 mil equinos y casi 40 mil porcinos. A continuación, en la Tabla I se detalla el stock por tipo de ganado. Analizando el stock de animales por departamento se puede observar que Malargüe es el departamento con mayor cantidad de animales debido al elevado número de caprinos de la zona. Este departamento cuenta con más de 620 mil cabezas, con una participación del 40% del stock ganadero provincial. En orden descendente siguen San Rafael, General Alvear, Lavalle.

Tabla I. Stock ganadero en Mendoza

ESPECIE	CABEZAS	PARTICIPACIÓN PROVINCIAL
 CAPRINOS	751.093	48%
 BOVINOS	514.368	33%
 OVINOS	143.074	9%
 EQUINOS	107.366	7%
 PORCINOS	39.292	3%
TOTAL	**1.555.193**	**100%**

Fuente: Fundación Coprosamen y Dirección Provincial de Ganadería. Campaña 2019

En la Tabla II se presenta la composición predominante en cada uno de los departamentos ganaderos de la provincia.

El impacto de la ganadería en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEIs) varía entre 7% y 18 %, esos porcentajes corresponden al CO_2 equivalente proveniente de la actividad y en particular la producción de carne en rumiantes (datos extraídos FAO, 2013, 2014; Bailey et al., 2014). En ausencia de medidas correctivas, el impacto ambiental de la producción ganadera empeorará drásticamente como se manifiesta en de Vries et al., 2010, siendo la producción bovina la que más impacta en el cambio climático. Según datos del World Bank, 2014 los valores de equivalentes de CO_2 Ton/ha (índice compuesto por Ton/Ha de CO_2, CH_4, y N_2O) para los países productores ganaderos fue: Argentina 59,92, Brasil 84,19, Paraguay 66,02, y Uruguay 146,02. En los reportes World Bank 2021-2022 en Argentina, las pérdidas anuales agropecuarias del secano por cambio climático por déficit o exceso de agua se estiman en 0,6 % del PBI. La principal preocupación para el futuro y el mercado de producción animal es reducir la CFP (principalmente las emisiones de GEI) en el ganado, teniendo en cuenta, como señalan Place and Mitloehner, 2012 la composición del alimento, la fermentación entérica, la eliminación de N y C y toda la cadena de transportación en el cálculo del LCA.

La ganadería sostenible se refiere a un sistema basado en 3 pilares: ambientalmente sano, económicamente viable y socialmente responsable. Requiere un enfoque de manejo del establecimiento ganadero, focalizado en un compromiso de mejora continua, lo que significa que se identifican y abordan las brechas de rendimiento, al tiempo que se reconoce que las acciones tomadas deben mantener un equilibrio adecuado entre los 3 pilares interdependientes de la sostenibilidad. Las políticas encaminadas a aumentar la productividad agropecuaria y la disponibilidad de alimentos, especialmente cuando van dirigidas a pequeños productores pueden permitir reducir el hambre incluso en los lugares donde la pobreza es generalizada tal como se detalla en FAO, FIDA y PMA, 2013 en El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo, las múltiples dimensiones de la seguridad alimentaria. Las propuestas de FAO, en Livestock solutions for climate changes 2017, abarcan tres caminos de sustentabilidad: 1- mejorar la productividad reduciendo la intensidad de las emisiones GEIs, 2- disminución de C mejorando la emisión en la eliminación (manejo de excresiones), y 3- mejorar la integración de los

pequeños productores en un modelo de bioeconomía circular eficiente. Estas soluciones pueden ser combinadas y también contribuyen a incrementar la resiliencia al cambio climático.

Tabla II. Stock ganadero en Mendoza por Departamento - 2019

ESPECIE	CABEZAS	PARTICIPACIÓN PROVINCIAL	COMPOSICION PREDOMINANTE
Malargüe	623.219	40 %	Caprinos (71%), bovinos (12%) y ovinos
San Rafael	304.851	20 %	Caprinos (36%), bovinos (42%) y ovinos
Gral. Alvear	153.884	10 %	Caprinos (8%), bovinos (80%)
Lavalle	148.147	9 %	Caprinos (76%), bovinos y ovinos (8%)
San Carlos	70.600	5 %	Caprinos (31%), bovinos (46%) y ovinos
La Paz	61.683	4 %	Caprinos (22%), bovinos (67%)
Santa Rosa	49.263	3 %	Caprinos (28%), bovinos (44%) y equinos
Norte	48.431	3 %	Caprinos (26%), bovinos (24%) y equinos
Tunuyán	25.139	2 %	Bovinos (60%), equinos (15%) y porcinos
Rivadavia	24.767	2 %	Bovinos (86%), equinos (5%)
San Martin	22.430	1 %	Bovinos (81%), caprinos (9%)
Tupungato	14.969	1 %	Bovinos (66%), caprinos (18%) y equinos
	1.555.193	**100%**	

Nota: los detalles por categoría y por departamento pueden diferir debido a falta de detalles en la información obtenida. Zona Norte corresponde a los departamentos de Las Heras, Capital, Guaymallén, Godoy Cruz, Luján de Cuyo y Maipú. Fuente: Clúster Ganadero de Mendoza en base a Dirección de Ganadería y Fundación Coprosamen.

La aplicación de innovadoras técnicas de alimentación bovina, como la mezcla de alimentos, bloques nutricionales, aditivos, enzimas y nuevas materias primas provenientes de desechos de otras industrias contribuyó a la ganadería sostenible mejorando el aprovechamiento metabólico y disminuyendo la eliminación de GEIs. La medición del comportamiento fisiológico de estos alimentos puede realizarse mediante la medición de biomarcadores para la eliminación de N-C. La relación Nureico /Creatinina, por ejemplo, permite visualizar el aprovechamiento del N entregado como alimento en función de la energía y la masa muscular (Scotti, 2011, tesis doctoral PROBIOL UNCUYO - CONICET).

Actualmente hay dos conceptos que en un futuro tenderán a desarrollar barreras arancelarias en el comercio internacional de productos agropecuarios, ellos son: la huella de carbono de la actividad y la implementación de tecnologías de mitigación.

El eje central en este proyecto es la interacción fluida entre el productor (responsable social y ambiental) y la Universidad junto al centro de investigación y desarrollo. Este es el factor clave para lograr los objetivos de mejorar la sostenibilidad ambiental en función de la rentabilidad del sistema y la trazabilidad ecológica hacia el comercio internacional.

En nuestro país contamos con una herramienta satelital, la constelación de dos satélites SAOCOM 1 (A y B); que permite detectar humedad del suelo, superficial y con cierta penetración en el mismo (de acuerdo al tipo de cobertura, textura de los suelos y contenido de humedad presentes) mediante la modelación de las imágenes de radar de apertura sintética o SAR (por su acrónimo en inglés) adquiridas. A partir de las mismas, se genera un producto satelital de humedad del suelo mediante la modelación de sus bandas polarimétricas. Esto permite tener un dato predictivo para asistir a los campos con medidas de manejo ganadero, como es el armado de bloques nutricionales.

En este proyecto se utilizaron datos satelitales de humedad en suelo y los vinculamos a la toma de decisiones para la suplementación mediante bloques nutricionales controlando la asimilación metabólica y la disminución de GEIs utilizando biomarcadores, evaluación veterinaria y descripción de la relación gramíneas/leñosas. Nuestras hipótesis (H) son: H1 el aporte de información satelital vinculada a la humedad de suelo en zonas ganaderas del secano, permitirá tomar decisiones frente a la condición nutricional de los animales y la suplementación, teniendo en cuenta la mitigación de gases de efecto invernadero. H2: la forma de muestreo y registro de parámetros bioquímicos-veterinarios y agronómicos, la forma de administración de los alimentos en la suplementación y los indicadores utilizados son adecuados para el seguimiento del estado nutricional de los animales y el estado forrajero del campo. En este trabajo la medición de la mitigación de GEIs contempla mediciones bioquímicas en orina basal que muestran la utilidad del nitrógeno como las determinaciones de urea/creatinina y también almidón en materia fecal. Se evaluó también la existencia del recurso hídrico y su aprovechamiento mediante imágenes satelitales de SAOCOM.

En próximos trabajos se evaluará la cobertura vegetal, la utilidad del suelo y el recambio de biomasa mediante teledetección.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es aportar información satelital para el estudio de la biomasa forrajera en el secano mendocino en relación al manejo ganadero de zonas áridas y semiáridas en un contexto de cambio climático.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1- Analizar los mapas SAOCOM 1 de humedad del suelo en distintos meses y correlacionar con las mediciones realizadas en campo.
2- Determinación de espejos de agua.
3- Seleccionar un indicador en las imágenes SAOCOM 1 que correlacione con el inicio de la suplementación.
4- Formulación de la suplementación alimenticia en forma de bloques nutricionales blandos o pasta.
5- Producción del alimento para las pruebas experimentales.

6- Mediciones de parámetros bioquímicos, veterinarios y agronómicos de sustentabilidad nutricional.
7- Seleccionar un indicador forrajero que correlacione con el estado nutricional y las imágenes SAOCOM 1.
8- Correlacionar variables para el armado de un nomograma.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 3 campos modelo para la puesta en marcha del proyecto, en esta primera etapa se realizaron determinaciones en el campo San Francisco (Lat.: -33.7493; Long.: -67.7647) y en dos campos El Bagual (Lat.: -34.3407; Long.: -68.3664 y Lat.: -34.4549; Long.: -68.4123) (ver Figura 2). Se transcriben los resultados de estos últimos campos.

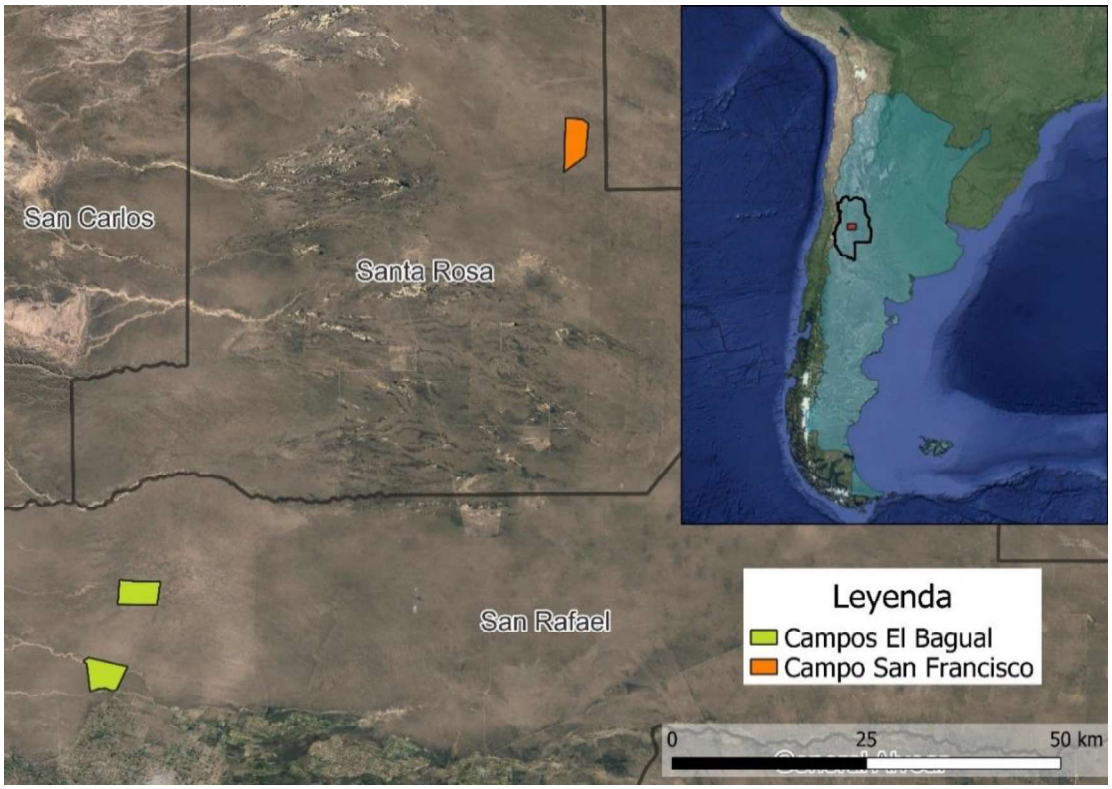


Figura 2. Ubicación de campos ganaderos San Francisco y El Bagual.

Se registran con las imágenes satelitales los espejos de agua denominados ramblones, los cuales son lagunas naturales no permanentes. Estos, con el transcurso de la temporada seca, van disminuyendo su área. Se registró el porcentaje de disminución en forma estimativa a partir de mapas de humedad del suelo elaborados por CONAE con imágenes satelitales SAOCOM 1 (Figuras 3 y 4).

Se preparó la formulación alimenticia en forma de bloques nutricionales, pasta blanda y líquido.

Los ingredientes utilizados son: desechos de la agroindustria, forrajeras del desierto encontradas en los campos, urea, vainas de *Neltuma sp*., sales minerales y cementantes.

Se realizaron los análisis de la propuesta alimenticia mediante las determinaciones de proteína bruta, fibra detergente neutra, fibra detergente ácida, lignina, energía metabólica, extracto etéreo, carbohidratos no estructurales, humedad, proteínas degradables y no

degradables por el rumen, energía neta y energía metabólica. La metodología fue espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente.

La determinación de sales abarcó a los siguientes elementos calcio, magnesio, fósforo, potasio, sodio, azufre, cloro, aluminio, cobre, hierro, cinc, manganeso, boro y DCAD que es balance catión anión dietario. La metodología fue espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP OES).

La asimilación metabólica se midió mediante urea, creatinina mediante técnicas colorimétricas y el almidón, clasificación de materia fecal; digestibilidad total aparente del almidón en el tracto digestivo, Cenizas.

El análisis de la oferta forrajera se realizó estimando en índice gramíneas /leñosas en el transcurso del tiempo. La duración del proyecto fue de 12 meses. Las imágenes satelitales fueron obtenidas periódicamente y se identificaron áreas rojas (secas) y azules (húmedas). El diseño de suplementación se realizó dando alimento en comederos en altura a todos los animales cuando ingresaban a la aguada en cantidades reguladas por la salinidad estimando una ingesta de 300 a 500 g por animal por día. La cantidad de comida era colocada diariamente.

Se recolectaron orina y materia fecal de los animales elegidos al azar, pero con tendencia de elegir los de menor condición corporal.

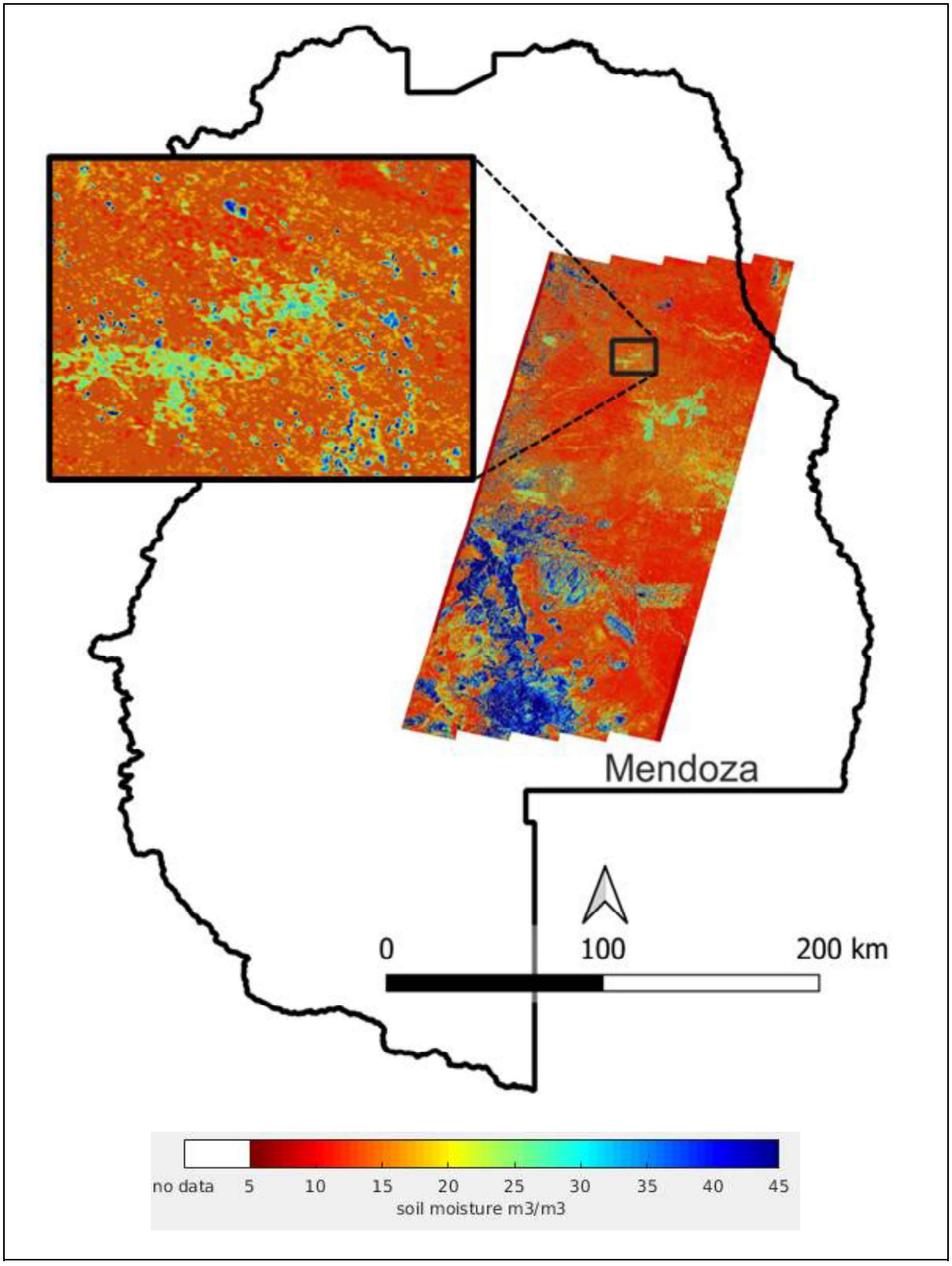


Figura 3. Mapa de humedad del suelo SAOCOM 1. Fuente: elaboración propia a partir de productos satelitales de la CONAE.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

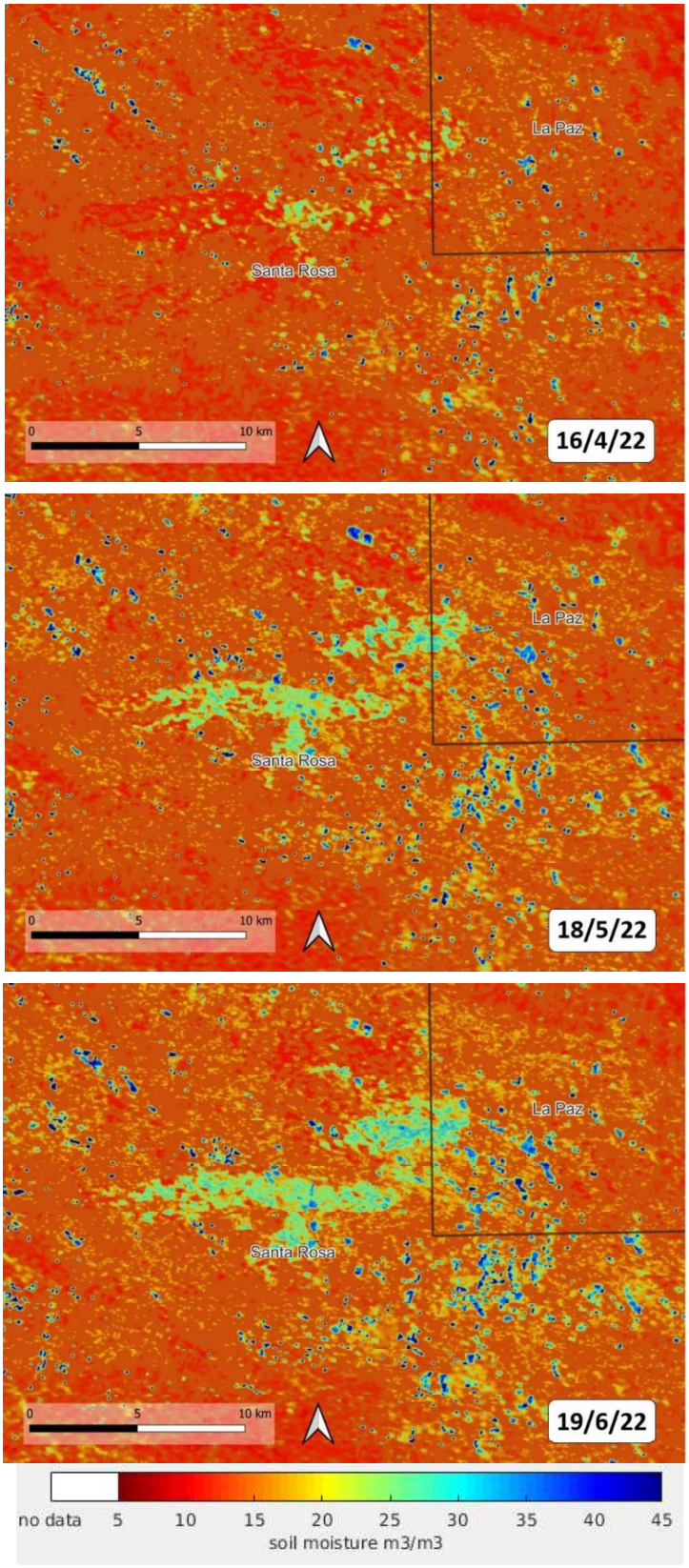


Figura 4. Evolución de humedad del suelo en campo San Francisco. Fuente: elaboración propia a partir de productos satelitales de la CONAE.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

RESULTADOS

En la Tabla III se detalla el contenido de sales que se le aplicó al alimento y en la Tabla IV las determinaciones realizadas a la formulación del alimento. Se observa la buena composición de nutrientes, sales minerales y energía.

Tabla III. Contenido de sales aplicadas al alimento

Elementos y otros	Unidades	Resultados Materia seca (MS)
Calcio	%	4.32
Fosforo	%	0.87
Magnesio	%	1.50
Potasio	%	0.38
Sodio	%	39.83
Azufre	%	0.90
Cloruro	%	48.42
DCAD	Meq/100 g	320.64
Aluminio	ppm	329
Cobre	ppm	624
Hierro	ppm	1952
Zinc	ppm	442
Manganeso	ppm	35.6
Boro	ppm	ND

Tabla IV. Determinaciones realizadas a la formulación de alimento

Descripción (%MS a menos que se especifique)	Base materia seca
Materia seca	90.12
Proteina cruda	11.26
Proteína Cruda Disponible	11.24
PCIDA	0.02
PCIDN	0.13
ADICP %CP	0.14
FDA	5.80
aFDN	10.19
Calcio	4.08
Fósforo	0.52
Magnesio	0.24
Potasio	2.43
Azufre	0.41
Grasa (EE)	1.17
Cenizas	29.39
Lignina	1.64
CÁLCULOS	
CNF	48.13
NRC 2001 Energy calculations Dairy NDT 1X	56.22
ENL 3X Mcal/kg	1.278
ENG Mcal/kg	0.638
ENM Mcal/kg	1.202
EM 3X NRC2001 Mcal/kg	2.088
EM 1X NRC2001 Mcal/kg	2.088

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Evaluación de la asimilación metabólica

La tabla V muestra la relación entre registros de asimilación de almidón, clasificación de materia fecal, relación gramíneas/leñosas, condición corporal, área de humedad en zonas de ramblones y registro de lluvias cercanas a la fecha de muestreo.

Tabla V. Registro cuantitativo/cualitativo de clasificación de materia fecal (MF), digestibilidad almidón, condición corporal (CC), relación gramíneas/leñosas, imágenes de humedad y suplementación en distintas fechas experimentales.

Mes	Digestibilidad Almidón	CC	Clas MF	Suplemento	Gram/leñ	Saocom Ramblón	Lluvias*
Enero	> 97 %	2,5	1-3	NO	>>1	+++	+++
Abril	> 97 %	1-5	1-2	SI	>1	++	-
Mayo	> 97 %	2	2-3	SI	>1	++	+
Junio	> 97 %	2	4-5	SI	>1	+	-
Julio	> 97 %	2	3-4	SI	<<1	-	-
Agosto	> 97 %	2,5	3	SI	<<1	-	-

*se refiere a lluvias en los 2 días previos o en el mismo día del muestreo.

La Tabla VI vincula los valores de urea, creatinina y Ur/Cr con valores de condición corporal y clasificación de materia fecal. La creatinina está en relación con la masa muscular mientras que la urea está relacionada con el aprovechamiento de nitrógeno.

Tabla VI. Valores de Urea y creatinina y Relación Ur/Cr en relación a parámetros de materia fecal (MF) y condición corporal (CC). CF: Condición fisiológica, SS: sin suplementación, CS con suplementación, B GEIs baja emisión de N, A GEIs alta emisión de GEIs.V/P: vaca vacía o preñada.

Fecha	Muestra	C.F	C.C	M.F	Urea (g/L)	Creatinina (g/L)	Urea/Creatinina	Observaciones
13-ene	1	V/P	2	1-2	0,83	0,21	3,95	SS/B GEIs
	2	V/P	2,5	1	2,25	0,3685	6,11	SS/B GEIs
	3	V/P	1,5	1	0,62	0,2105	2,95	SS/B GEIs
	4	V/P	2	1-2	12,73	1,316	9,67	SS/B GEIs
24-ene	1	V/P	2	3	23,4	2,391	9,79	SS/ B GEIs
	2	V/P	2	3	7,99	0,783	10,2	SS/ B GEIs
	3	V/P	2	3	4,04	0,783	5,15	SS/ B GEIs
	4	V/P	2,5	3	2,29	1,043	2,2	SS/ B GEIs
	5	V/P	2	3	16,31	0,826	19,74	SS/ A GEIs
6-abr	1	V/P	2	1	49,5	0,842	58,79	CS/ A GEIs
	2	V/P	1,5	1	2,8	0,158	17,72	CS/B GEIs
	3	V/P	2	2	20	0,842	23,75	CS/A GEIs
	4	Lactancia	1,5	2	3,05	0,3155	9,67	CS/B GEIs
	5	Lactancia	1,5	3	10,78	0,475	22,69	CS/A GEIs
13-may	1	V/P	2	2	14,5	1,105	13,12	CS/B GEIs
	2	V/P	2	3	5,51	2,84	1,94	CS/B GEIs
	3	Lactancia	1,5	2	9,43	0,526	17,93	CS/B GEIs
	4	Lactancia	1,5	3	19,25	2,58	7,46	CS/B GEIs
	5	V/P	2,5	3	9,05	0,421	21,5	CS/A GEIs
	6	V/P	2,5	3	5,44	0,895	6,08	CS/B GEIs
28-may	1	V/P	2	3	10,4	1,42	7,32	CS/B GEIs
	2	V/P	2	3	6,21	0,685	9,07	CS/B GEIs

Cuanto menor sea la excreción de nitrógeno y de almidón al medio en función del alimento mayor es la mitigación de GEIs. Valores bajos de creatinina, baja masa muscular con alta cantidad de urea eliminada significa desbalance y/o mal aprovechamiento.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Valores altos de creatinina con baja urea y buena condición corporal y buena clasificación de materia fecal indican buen balance y buen aprovechamiento con mínima eliminación de C y N al medio.

Registro de imágenes satelitales

Se obtuvieron 3 imágenes satelitales. Se analizaron los patrones de humedad encontrados (Figura 5) y se cuantificaron semicuantitativamente.

Se identificaron los ramblones y se tuvo en cuenta la disminución en cantidad y área. Se realizó una galería de imágenes satelitales de las zonas en estudio. Se encuentran marcados los ramblones. Se observa en la figura 5 los cambios en las zonas azules y rojas de 3 fechas distintas.

Se seleccionó como indicador del momento a suplementar la disminución del área de ramblones a más del 40 %, como también la disminución de zonas azules calculadas en forma cualitativa. Paralelamente se observó la pérdida de humedad en suelo.

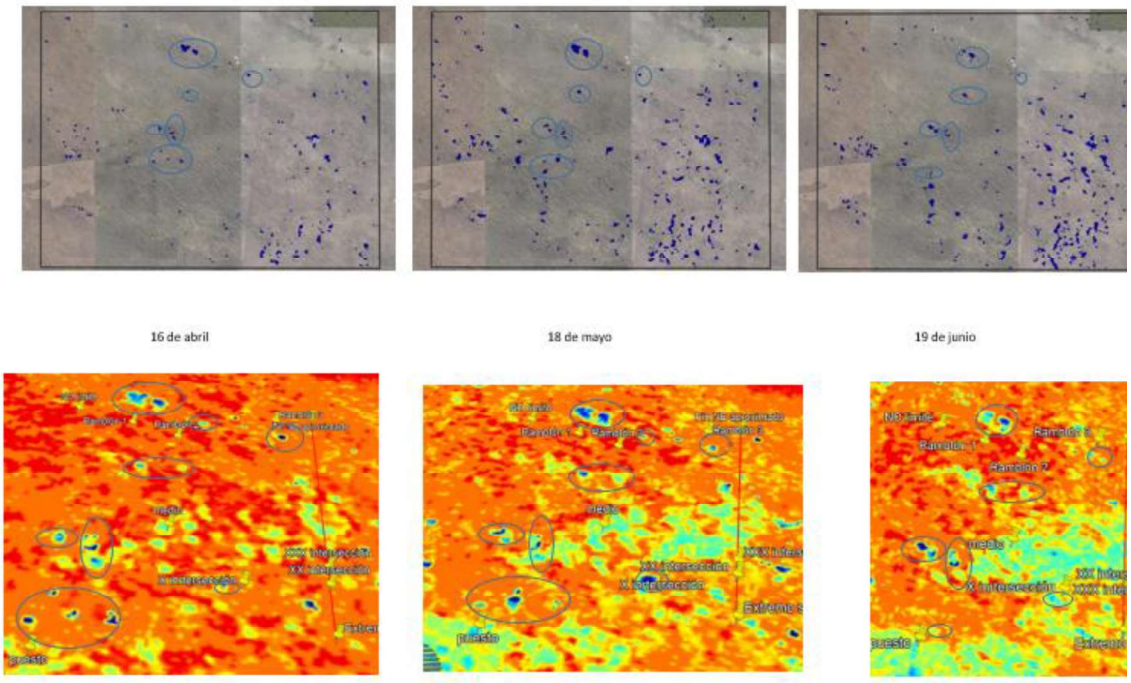


Figura 5. Análisis de ramblones en campo San Francisco.

CONCLUSIONES

Se concluye que el indicador SAOCOM 1 para el inicio de la suplementación fue útil y los ingredientes de los bloques nutricionales aportaron la ingesta calórico-proteica necesaria para el cambio de composición corporal en 1 punto. La eliminación de C y N al medio fue mínima con los ingredientes aplicados, la digestibilidad de almidón estuvo en valores altos y la Ur/Cr permitió detectar valores altos y bajos además de inferir catabolismo con alta emisión de GEIs o anabolismo con altos y bajos valores de GEIs.

En cuanto a los inconvenientes notamos que la elaboración de bloques nutricionales en este tipo de esquema experimental necesita de una planta piloto de elaboración, es por ello que el alimento se entregó en forma de pasta y racionado diariamente. El objeto del bloque nutricional es entregarlo para ser consumido con autocontrol, sin necesidad de

 ISBN: 978-987-1323-89-0

entrega diaria, pero esto no fue posible por falta de maquinaria para realizar bloques en alta cantidad. Para lograr el seguimiento de individuos representativos de la población y verificando ingesta real de cada uno de ellos necesitaríamos personal e infraestructura inexistente. En otro tipo de esquema se podría verificar la ingesta del 100 % de los animales suplementados, pero para ello necesitamos el escalado a planta piloto de producción de alimento. En este sentido podemos remarcar que la planta piloto de producción de alimento suplemento permitirá tener una transferencia directa al sector.

REFERENCIAS

Bailey, R., Froggatt, F and Wellesley, L. Energy, Environment and Resources Livestock – Climate Change's Forgotten Sector: Global Public Opinion on Meat and Dairy Consumption. *Chatman House, The Royal Institute of International Affairs* (2014).

de Vries, M., & de Boer, I. J. M. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science,* 128(1-3), 1-11. (2010). https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007

FAO, FIDA y PMA. El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo. Las múltiples dimensiones de la seguridad alimentaria. Roma, FAO (2013).

FAO, Tackling Climate through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities. Roma, 2013

FAO, 'Agriculture at the UN Climate Change Talks', Roma (2014).

FAO, Livestock solutions for climate change, Roma (2017).

Place SE, Mitloehner FM. Beef production in balance: considerations for life cycle analyses. Meat Sci. 2012 Nov;92(3):179-81. doi: 10.1016/j.meatsci.2012.04.013. Epub 2012 Apr 13. PMID: 22551868 (2012)

Scotti tesis Doctoral titulada: Evaluación de indicadores tempranos de sustentabilidad nutricional desde el análisis de sistemas productivos agropecuarios de zonas áridas. Biblioteca PROBIOL UNCUYO CONICET- https://probiol.uncuyo.edu.ar › upload › egresado (2011).

World Bank. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports (2014).

World Bank. Climate and Development: An Agenda for Action - Emerging Insights from World Bank Group 2021-22 Country Climate and Development Reports (English). Washington, D.C.: World Bank Group (2022).

COMBINACIÓN DE NUBES DE PUNTOS PARA LA DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE ENTORNOS COMPLEJOS: EL CASO DE LA *GROTTA DI SAN MICHELE ARCANGELO (ITALIA)*

Sara Antinozzi, Lorena Centarti, Albina Cuomo, Alessandro Di Benedetto, Andrea di Filippo, Carla Ferreyra, Caterina Gabriella Guida, Domenico Guida, Marco Limongiello, Juan Pablo Panero

Departamento de Ingeniería Civil, DICIV, Universidad de Salerno, ITALIA

e-mail: santinozzi@unisa.itc

RESUMEN

Los avances tecnológicos han permitido llevar a cabo relevamientos con una mayor precisión y rapidez. El combinar tecnologías de punta en el campo de la ingeniería gráfica permite extraer información geométrica, interna y externa, de entornos complejos como el caso del patrimonio cultural y natural subterráneo. El caso de estudio es la Gruta de San Michele Arcangelo, una cavidad natural situada en el municipio de Olevano sul Tusciano, en la provincia de Salerno, Italia. Combinando la tecnología SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) para el reconocimiento interno y el sistema UAV LiDAR (Light Detection and Ranging) para el externo, se obtuvo un modelo 3D completo del entorno analizado. El objetivo de esta investigación fue proporcionar a la comunidad académica información tridimensional actualizada de escenarios particulares, utilizando la integración de las nuevas tecnologías digitales y definiendo las mejores prácticas para su aplicación en diferentes ámbitos técnicos científicos. Generando una documentación eficaz incluso para un público vasto, interesado en emprender estrategias de documentación, conservación y valorización del patrimonio hipogeo. La base de datos obtenida gráfica y semántica del entorno digitalizado, puede convertirse en un marco crucial para la comprensión, el monitoreo y la gestión de la información de estos entornos complejos.

Palabras Clave: SLAM, UAV LiDAR, Base de Datos, Patrimonio Hipogeo

INTRODUCCIÓN

En el ámbito del *Cultural Heritage,* el Patrimonio Hipogeo representa un caso peculiar. El escaso o nulo conocimiento y documentación de estos ambientes limita con frecuencia su correcta gestión, monitoreo y puesta en valor (Pace G. & Salvarani R. 2021).

Las grutas son cavidades tridimensionales en el subsuelo, accesibles a la exploración humana (de Waele et al, 2018), pero su cartografía es a menudo una tarea ardua, condicionada por los complejos factores ambientales. Superficies irregulares, terrenos inaccesibles y zonas que presentan condiciones peligrosas, desafían la documentación y digitalización de estos entornos subterráneos. Factores como la escasa iluminación, los pasajes estrechos y caminos articulados, implican la adquisición de una cantidad considerable de información 3D, difícil de gestionar.

Los tipos actuales de cavidades, naturales o artificiales son numerosos, algunos difusos, raros o típicos sólo en zonas limitadas. Esta variedad ha determinado recientemente la necesidad de proporcionar una catalogación nacional detallada de estos espacios. En particular, la Comisión de Cavidades Artificiales de la Sociedad Espeleológica Italiana (1999) ha definido una codificación “estándar” que incluye todas las tipologías de cierta

recurrencia, clasificándolas por analogía en las siguientes categorías: obras hidráulicas, obras de asentamiento civil, obras de culto, obras militares, obras mineras, vías de tránsito y aquellas obras no clasificadas, como por ejemplo museos y lugares de reunión.

En Italia, el nivel de interés de estos lugares varía considerablemente de una región a otra, dependiendo generalmente de la difusión e importancia o riqueza de las cavidades. En el mundo la situación es diferente, la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS/UNESCO), dedica cada vez más atención a la exploración de los yacimientos arqueológicos debido a la urgente necesidad de profundizar en su conocimiento, tanto a escala territorial como urbana.

Durante el último siglo, las inestabilidades antropogénicas pueden correlacionarse con la evolución de los "sistemas geotécnicos" vinculados a las variaciones naturales (Zimbardo M., et al, 2012). El aumento de la intensidad de las precipitaciones, consecuencia de la aceleración de los cambios climáticos, así como factores intrínsecos relacionados con la naturaleza, constitución de las rocas (presencia de fracturas, juntas, heterogeneidades singénicas o inducidas) y factores dependientes del uso de las superficies (aumento de las sobrecargas relacionado con el tamaño y el uso previsto de los edificios, rutas, etc.) alteran su estructura y características (Bruno G. & Rotolo M.,2019). Estos fenómenos y la complejidad de su interpretación demuestran cuán inadecuados son, a menudo, los conocimientos técnicos y operativos para intervenir en estos entornos subterráneos, y la urgencia de iniciar estudios integrados multidisciplinares, teniendo en cuenta su complejidad, la falta de documentación y de literatura especializada, indispensables para una efectiva protección del patrimonio.

Actualmente la investigación nacional e internacional sobre el Patrimonio Cultural, trata la adquisición, monitoreo y gestión de datos, utilizando las nuevas tecnologías digitales de la información y la comunicación. Numerosos son los proyectos de *Horizon Europe, Athena; OpenHeritage; E-RHIS*, con interesantes experimentos que proponen sistemas de visualización y uso digital, incluso interactivos como *Emotive; Inception; Arches; Time Machine*. Estas investigaciones, sin embargo, se refieren generalmente a un patrimonio del que las realidades hipogeas suelen estar excluidas, razón por la cual, la Universidad de Salerno junto a otras Instituciones de la región, manifiesta la voluntad de desarrollar un proyecto de relevante interés Nacional (PRIN, 2022).

Partiendo de estas premisas y a través de un enfoque multidisciplinar, se busca investigar el patrimonio hipogeo con sus múltiples características, y así satisfacer la necesidad común de dar valor a lugares poco conocidos pero que representan, para los territorios que los conservan, un fuerte elemento de identidad.

CASO DE ESTUDIO

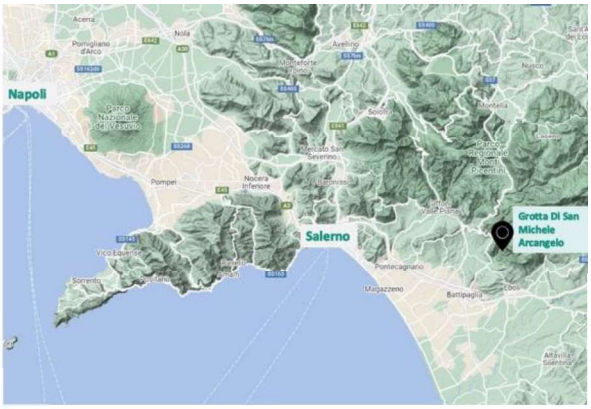
Situada a unos 650 m. sobre el nivel del mar, la Gruta de San Michele Arcangelo en el Municipio de Olevano sul Tusciano, Provincia de Salerno, Italia, se encuentra a una hora a pie de la ciudad de Ariano en el monte Raione. A la Gruta se puede acceder a través de dos senderos que ascienden por los laterales del monte, para volver a unirse en un estrecho tramo de escaleras que conduce finalmente a la entrada de esta. Un elemento calificador del paisaje cultural que la rodea es el constituido por los antiguos asentamientos antrópicos dispersos entre las alturas, colinas y mesetas de la zona (Fig.1).

Siendo una estructura subterránea con función religiosa construida en una cueva natural, nace como lugar de culto y centro de peregrinación a principios de la Edad Media; el santuario es uno de los asentamientos altomedievales mejor conservados de Europa y uno de los primeros registros fechados del mismo, se remontan al siglo IX d.C., ya que era una parada en las rutas de peregrinación de los monjes que viajaban a Tierra Santa.

a.



b.



c.

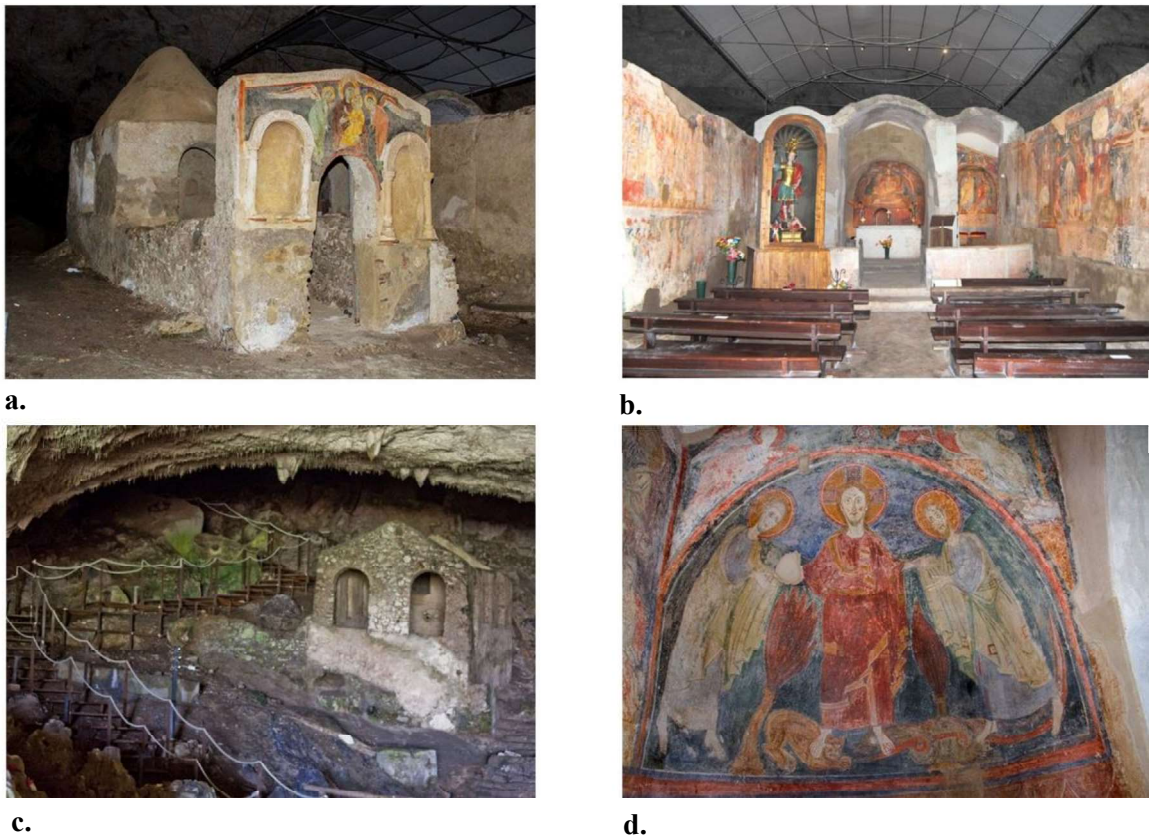


Figura 1. a. Provincia de Salerno, Italia; **b.** Parco Regionale Monte Picentini; **c.** Gruta San Michele Arcangelo (http://www.olevanosultuscianoarte.it/ último acceso 24.02.2023).

El complejo incluye dos espacios funcionales distintos: uno externo, formado por los restos de un monasterio y murallas defensivas; el otro, el santuario propiamente dicho, que se halla en el interior de la gruta y reviste especial importancia artística (Fig. 2). Consta de cinco edificios de valor tanto histórico como arquitectónico ya que en ellos confluyen lenguajes que revelan diferentes tradiciones culturales, llamados *martyrion;* también se encuentra una basílica con una única sala con frescos de época lombarda, dos santuarios con patio, una iglesia y un oratorio. Estas pequeñas arquitecturas marcan un camino devocional que se extiende por el interior de la gruta unos 900 metros.

Aún hoy, la Gruta de San Michele Arcangelo sigue siendo el destino de numerosas peregrinaciones, catalogado por el *World Monuments Fund* como uno de los cien monumentos más importantes del mundo, conserva su continuidad histórica y artística

entre el pasado y el presente, un raro tesoro de la Edad Media que ha llegado hasta nosotros, digno de ser conocido, investigado y salvaguardado.



a. **b.** **c.** **d.**

Figura 2. a. Cúpula cónica de tradición típicamente oriental de la capilla principal; **b.** Capilla con elementos típicos de las culturas longobarda y romana; **c.** Recorrido interior de la Gruta; **d.** Frescos de la escuela romano-bizantina (http://www.olevanosultuscianoarte.it/ último acceso 24.02.2023).

METODOLOGIA

La Gruta se caracteriza por la complejidad volumétrica, la presencia de agua en la superficie interior, las malas condiciones de iluminación y la difícil accesibilidad, incluso con intervenciones de mantenimiento efectuadas en los últimos años.

En la investigación se desarrolló una metodología de digitalización tridimensional aplicada al caso de estudio, considerada una práctica habitual con fines de documentación, conservación, preservación y visualización. Si bien existe una gran variedad de metodologías de adquisición de datos, tal como se observa en la Fig.3, dependiendo de las características del entorno a escanear, o incluso del output que se desea obtener, será el método de digitalización utilizado, de esto dependerá el tipo de resultado y calidad de los datos obtenidos (Barba et al, 2021). Es importante saber que ninguna técnica de adquisición puede utilizarse correctamente sin comprender su potencial de precisión, sus limitaciones y su comportamiento en determinadas condiciones de trabajo. Se debe de tener un enfoque correcto para decidir qué técnica es

 ISBN: 978-987-1323-89-0

la más adecuada para una situación concreta, y se debe de aplicar una metodología capaz de predecir y calcular la calidad de los resultados finales.

Existen limitaciones derivadas de las condiciones geológicas, geotécnicas, estáticas y medioambientales que no permiten el normal desarrollo de los proyectos, la geometría descriptiva completa de este patrimonio es el primer paso para obtener el conocimiento y proporcionar una imagen 3D fiable de los entornos subterráneos (Galera Rodríguez et al, 2022). Junto con las investigaciones geológicas, la representación clara y completa de estos espacios es crucial para invertir en su conservación o planificar una nueva intervención. La aplicación de esta metodología pretende obtener un producto y un procedimiento que pueda reproducirse en similares zonas de interés.

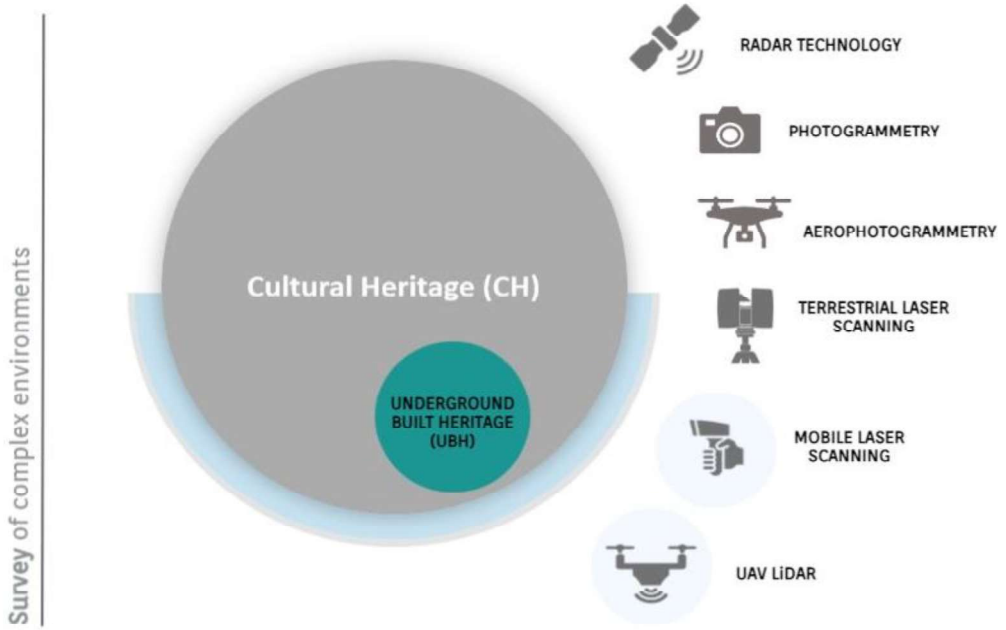


Figura 3. Métodos de adquisición de datos, énfasis en las tecnologías implementadas (elaboración del autor).

Ha sido implementada una estrategia de combinación de datos: para el reconocimiento interno se utilizó el láser escáner con tecnología SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) y para el externo, el sistema UAV LIDAR *(Light Detection and Ranging)*; gracias a éstos, fue posible obtener una nube de puntos completa de toda la Gruta.

A través de un sistema de escaneado láser portátil y ligero, el GeoSLAM ZEB Horizon, se caracteriza por su practicidad en espacios interiores, túneles y entornos subterráneos ya que no precisa de señal GNSS ni luz para su funcionamiento. En cuanto a la adquisición de datos del ambiente externo, fue utilizado un cuadricóptero profesional UAV DJI M300, equipado con receptor GNSS RTK, como plataforma para montar el DJI Zenmuse L1.

Las principales características de ambos presentes en la Fig.4, dan como resultado en la fase de post-procesamiento la integración en una nube de puntos (Fig.5), una adquisición digital no invasiva de datos métrico-formales capaz de ser utilizada como fuente de información para el registro y catalogación del patrimonio hipogeo (Corrao, et al, 2021).

De la nube de puntos, se han podido obtener cada uno de los outputs requeridos en el marco de esta investigación. Los resultados expuestos, son parte de un trabajo que se encuentra en desarrollo en el ámbito de una colaboración entre la Universidad de Salerno, el Consorzio inter-Universitario previsione e prevenzione Grandi Rischi (CUGRI), el Parque Nacional de Monti Picentini y la Comuna de Olevano Sul Tusciano.

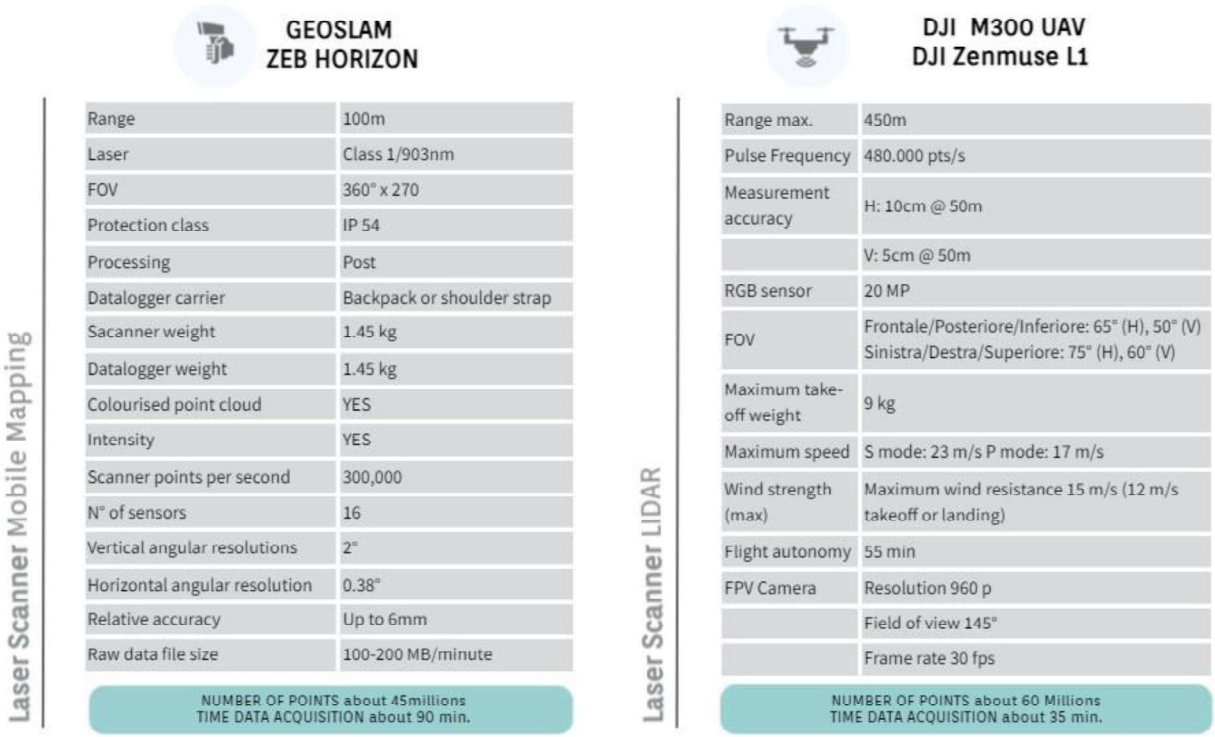


Figura 4. Tabla de características técnicas de la instrumentación utilizada (elaboración del autor).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

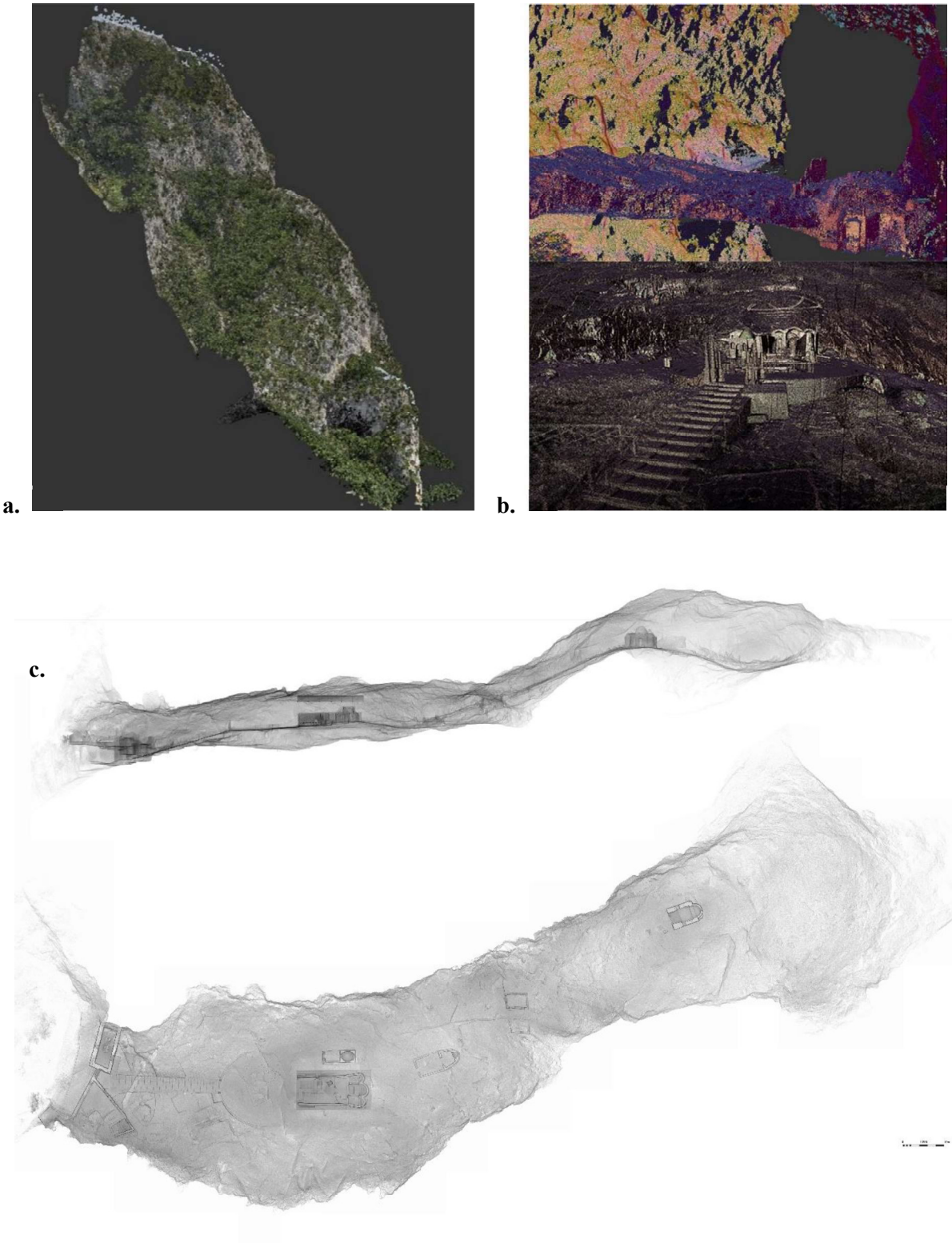


Figura 5. a. Nube de puntos externa obtenida como primer output del proceso de digitalización. **b.** Nube de puntos interna. **c.** Ortofoto con arquitectura interna, sección y planta (elaboración del autor).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

RESULTADOS

En una instancia inicial, la tarea de individualizar, visualizar y detallar el estado actual de las fallas y discontinuidades geológicas presentes en la Gruta (Fig.6), fue posible a través del uso de diferentes metodologías de análisis y programas, obteniendo del contraste de ambas nubes las diferencias de alturas entre interior-exterior, así como la geolocalización de los puntos críticos, e incluso las dimensiones de los bloques de roca fracturada en ambos sentidos. De esta manera se desarrolló una base de datos para el control y el seguimiento de la acción mecánica en la Gruta, evaluando condiciones y evolución en el tiempo para su monitoreo (Zimbardo M., et al, 2012).

Desde un enfoque arquitectónico, fue posible individualizar cada una de las estructuras construidas, desarrollar planos, cortes e incluso detectar de forma incipiente el estado actual de las mismas (Fig.7). Además, este procedimiento puede ser extendido a diferentes ámbitos como el de la geología, la geotecnia, la topografía, la ingeniería estructural, naturalista y medioambiental, y de esta manera desarrollar un inventario completo de este patrimonio hipogeo (Antonio and Ubierna, 1998).

La base de datos implementada, además, podrá ser utilizada para futuras aplicaciones como el diagnóstico y la supervisión de condiciones micro climáticas y medioambientales de los emplazamientos mediante tecnologías de control activo; digitalización de datos informativos sobre la historia, técnicas de construcción, restauraciones y el estado de conservación de las mismas; elaboración de modelos digitales con datos de información multimedia para una posible fruición virtual con técnicas AR/VR/MR (Brusaporci et al, 2021); exposición de contenidos informativos con el fin de planificar medidas de conservación y mejoramiento creando escenarios inmersivos y visitas virtuales que permitirán al usuario sumergirse y navegar por los entornos subterráneos (Fig.8).

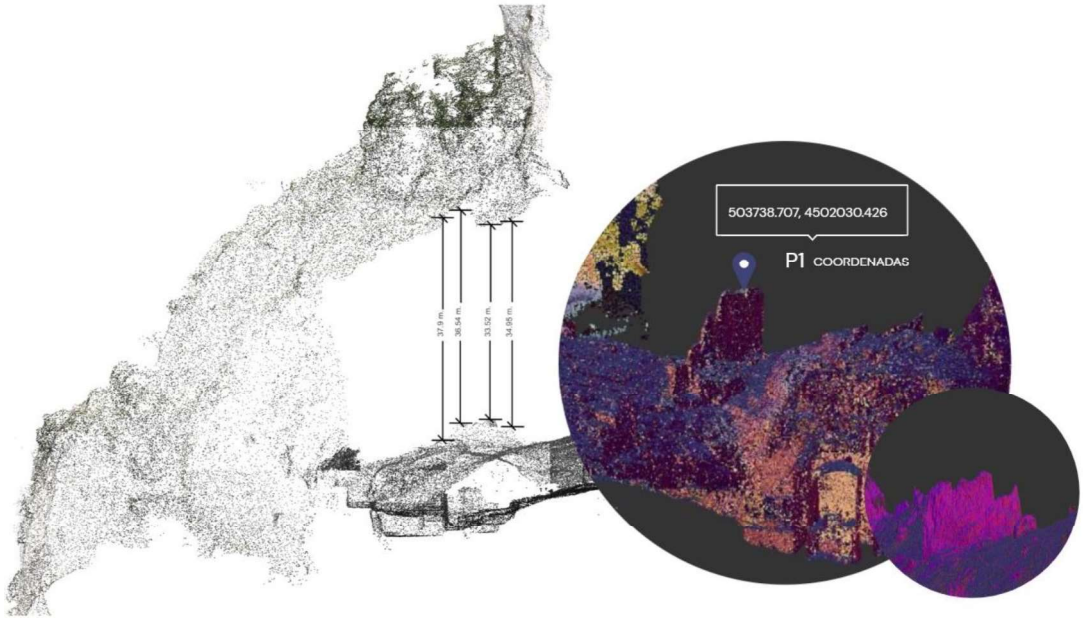


Figura 6. Sección de la nube de puntos utilizada para el cálculo del espesor -izquierda- detección de fallas y discontinuidades geológicas -derecha- (elaboración del autor).



Figura 7. Planta y corte arquitectónico, identificación de estructuras internas (elaboración del autor).

CONCLUSIONES

En los últimos tiempos, el impacto de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en sectores como la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) ha proporcionado herramientas que han cambiado la estructura de diseño, producción, gestión y monitoreo de edificios. También hay muchas aplicaciones e implicaciones potenciales del uso de las tecnologías digitales con referencia a la documentación y difusión del patrimonio cultural, como el subterráneo, menos conocido por el gran público, por ser inaccesible.

La idea de estructurar modelos digitales semánticos, que permitan procesar y correlacionar datos de distinta naturaleza (Dhonju et al.), ofrece nuevas perspectivas para la comunidad científica y abre nuevos horizontes en el proceso de almacenar datos, adquiridos a través de investigaciones para ser capaces en determinadas condiciones (como la estabilidad del terreno y las rocas, la capa superficial del suelo y el subsuelo, la salubridad, la accesibilidad, etc.) y transmitir estos datos en modelos 3D interoperables (Apollonio et al, 2013), permitiendo a técnicos y expertos descodificar y comprender plenamente el patrimonio investigado, proporcionar intervenciones específicas para la seguridad, gestionar los flujos de información de manera integrada y actualizable y garantizar así un uso concreto de estos espacios.

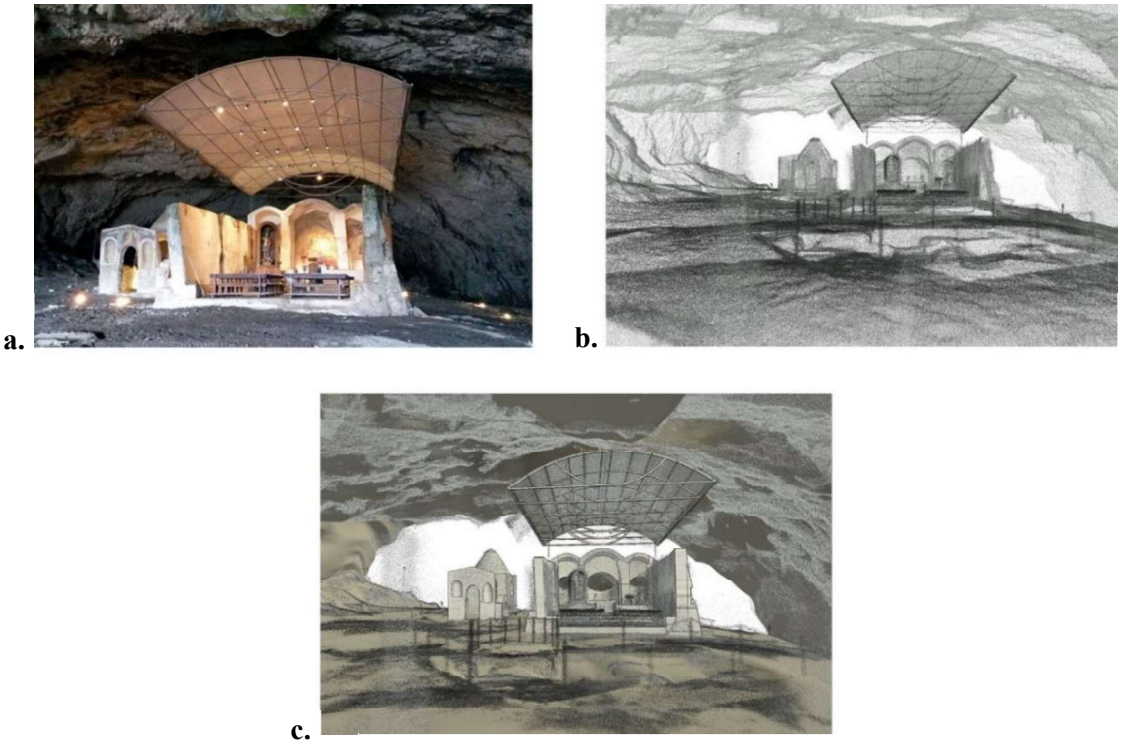


Figura 8. a. Imagen fotográfica del patrimonio natural y arquitectónico de la Gruta; **b.** Nube de puntos. **c.** Modelo 3D a partir de la nube de puntos (elaboración del autor).

Las potencialidades en la implementación de datos en modelos semánticos que exploten plenamente la potencia visual de las simulaciones digitales (Chiarenza S. and Messina B.,2020), ofrece una posibilidad de acceso alternativo al patrimonio hipogeo. Esto permite a un público más amplio de visitantes y turistas experimentar a distancia estos espacios (Mulec, 2013), mediante el uso de sistemas adecuados capaces de geolocalizar el patrimonio y todo aquello relacionado con él. A través de la elaboración de mapas interactivos, el usuario puede acceder a múltiples informaciones, difundidas por herramientas digitales, haciendo accesible a todos los patrimonios subterráneos, in situ o a distancia (Valente et al.), lo que significa que muchos sitios hoy poco conocidos, se incluyan en circuitos turísticos más amplios, definidos como sistemas de bienes y servicios necesarios para satisfacer necesidades e intereses de carácter económico, infraestructural, cultural y social.

REFERENCIAS

Ubierna Juncá J.A. Tunnel Heritage in Spain: Roots of the Underground. (1998).

Apollonio, F I, M Gaiani, and Z Sun. 3D Modeling and Data Enrichment in Digital Reconstruction of Architectural Heritage. (2013).

Barba, S., Ferreyra C., Cotella V.A, di Filippo A., Amalfitano S. A SLAM Integrated Approach for Digital Heritage Documentation. *Culture and Computing. Interactive Cultural Heritage and Arts.HCII*. (2021).

Bruno G., and Rotolo M. Analisi di stabilità di un frantoio ipogeo ubicato sul fianco di un versante in roccia calcarenitica in agro di Monopoli. (2019).

Brusaporci, Stefano et al. Mixed Reality Experiences for the Historical Storytelling of Cultural Heritage. (2021).

Chiarenza S., and Messina B. Visual Information and Graphic Communication Models of the Amalfi Coast Landscapes. S*ustainable Mediterranean Construction, Vol. 12, pp.119-124.* (2020).

Corrao R., Di Paola F., Termini D., Vinci C. Investigation of the underground building heritage and the mechanism of water flowing in Ganāts in Palermo through innovative surveying techniques. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVI-M-1–*2021. (2021).

Dhonju, Hari K. et. al. Share our cultural heritage (SOCH): Worldwide 3D heritage reconstruction and visualization via web and mobile GIS. *Canadian Historical Review 7.9* (2018).

Galera Rodríguez, A., Angulo Fornos, R., Algarín Comino, M. Survey and 3D Modelling of underground heritage spaces with complex geometry: surface optimisation for association with HBIM methodology. *Scires-it 12.1* (2022).

Mulec, J. Human impact on underground cultural and natural heritage sites, biological parameters of monitoring and remediation actions for insensitive surfaces: Case of Slovenian show caves. *Journal for Nature* Conservation 22.2 (2014).

Pace G., and Salvarani R. Underground Built Heritage Valorisation: A Handbook. (2021).

Valente E., Santo A., Guida D., Santangelo N. Geotourism in the cilento, vallo di diano and alburni UNESCO global geopark (Southern Italy): The middle bussento karst system. *Resources 9.5* (2020).

De Waele J., Fabbri S., Santagata T., Chiarini V., Columbu A., Pisani L. Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romagna, N. Italy). *Geomorphology 319* (2018).

Zimbardo M., Ercoli L., Nocilla N. Durability of calcarenitic hypogea in the underground cultural heritage of Palermo (Sicily). *CRC Press* (2012).

VARIABILIDAD DE LA OFERTA HÍDRICA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO

Carolina Aumassanne[a], Ana Paula Salcedo[b], Fernanda Gaspari[c], Jorge Bonilla[b], Dardo Fontanella[a]

[a]*Agencia de Extensión Rural de INTA 25 de Mayo, La Pampa, ARGENTINA*
[b]*Subgerencia Centro Regional Andino, INA, Mendoza, ARGENTINA*
[c]*Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nac. de La Plata, ARGENTINA*

e-mail: aumassanne.carolina@inta.gob.ar

RESUMEN

En los oasis productivos del centro oeste de Argentina, toda la actividad agrícola, industrial, hidroeléctrica y los asentamientos humanos, dependen del agua proveniente de la fusión de la nieve y de los cuerpos de hielo que se encuentran en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes. La oferta hídrica de estas cuencas tiene condicionantes climáticos y geográficos, por ello, su régimen hídrico está sometido a variaciones anuales e interanuales, modulado por la intensidad y duración de las precipitaciones níveas. El objetivo de este trabajo fue estudiar la variabilidad temporal de la precipitación y los caudales erogados en la cuenca alta del río Colorado. Se recopilaron registros de caudal de 7 estaciones de aforo y de precipitación de 3 estaciones meteorológicas en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, para el período 1991-2021. Los datos fueron descargados de Base de Datos Hidrológica Integrada a cargo de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Se realizó un análisis estadístico descriptivo mediante Infostat, de los caudales mensuales y anuales, obteniendo los parámetros de máximo, mínimo, desvío estándar y tendencias de cada estación y parámetro evaluado. La mayor precipitación mensual ocurre en el período invernal, siendo el mes de junio con el mayor registro en las 3 estaciones analizadas. El régimen hídrico del río Colorado se caracteriza como fuertemente estacional, con crecidas que se presentan en el período octubre/marzo, siendo el río Grande el mayor afluente. Puede observarse una tendencia negativa en el derrame de las 7 estaciones analizadas, con derrames por debajo de su promedio en los últimos 10 ciclos hidrológicos analizados.

Palabras Clave: Cuencas hidrográficas, Derrame, Río Colorado, variabilidad, precipitaciones.

INTRODUCCIÓN

En la Cordillera de los Andes aproximadamente entre 28°S y 37°S se ubican las nacientes de diversos ríos que pertenecen al sistema hidrológico del río Colorado. Estos ríos se alimentan, principalmente, de la fusión de la nieve que se acumula durante cada invierno y son la principal fuente de agua superficial para los oasis irrigados aguas abajo, donde se desarrollan las principales actividades socio-económicas (Boninsegna y Llop, 2015). La oferta hídrica de estas cuencas está regulada por condicionantes climáticos y geográficos, por ello, su régimen hídrico está sometido a variaciones anuales e interanuales, modulado por la intensidad y duración de las precipitaciones níveas (Boninsegna y Villalba, 2006). Las poblaciones dependientes de las cuencas de los ríos alimentados por la nieve, tendrán suministros menores de agua durante el correr de los años, suponiendo que las tendencias climáticas continúen (ADB, 2013). Particularmente, los últimos 11 años estuvieron dominados por un período prolongado de sequía hidrológica en el cual el déficit en la cantidad de nieve acumulada se propagó a lo largo de las distintas componentes del ciclo hidrológico regional (Rivera *et al*., 2021). La "mega

 ISBN: 978-987-1323-89-0

sequía" como ya comienza a denominarse en la reciente bibliografía científica, se caracteriza por un aumento de ~0.8 °C en la temperatura media anual del aire y una reducción de un 40 % en las precipitaciones anuales (Garreaud *et al*. 2017, Fuentealba *et al.* 2021). Por otro lado, existe una demanda de agua cada vez mayor en la región debido a nuevas actividades y usuarios, esta demanda encuentra un límite existente en la disponibilidad real de agua. El sector agropecuario es la principal actividad productiva sobre la cual se estructura la actividad económica de la región del Colorado. En este contexto se define como objetivo del presente trabajo estudiar la variabilidad temporal de la precipitación y los caudales erogados en la cuenca alta del río Colorado.

Área de estudio

El río Colorado se origina de la confluencia de dos de sus principales afluentes, los ríos Grande y Barrancas. Recorre alrededor de 1200 km atravesando parte de las provincias de Mendoza, Neuquén, Río Negro, La Pampa y Buenos Aires. Tiene un derrame anual promedio de 4380 Hm^3 y una superficie total de drenaje de 47.459 km^2. Su caudal medio anual es de 138,8 $m^3.s^{-1}$ (COIRCO, 2015), caracterizado por una marcada estacionalidad primavero-estival, atribuida a su régimen principalmente nival. Pertenece al grupo de los sistemas patagónicos de vertiente atlántica (Weber *et al*., 2005). El río Colorado adquiere la tonalidad que le da nombre, a partir del arrastre y aporte de sedimentos provenientes de secuencias clásticas tales como areniscas, pelitas y conglomerados. Estas unidades sedimentarias están intensamente afectadas por la erosión fluvial, tanto de los cauces principales como de tributarios estacionales, los cuales dado el transporte de sedimentos que realiza, suelen generar extensos abanicos aluviales. Esta condición se mantiene en cercanías al ingreso del embalse de Casa de Piedra, donde la carga clástica transportada se deposita en el lecho del mismo.

La subcuenca del río Grande está situada enteramente en la provincia de Mendoza, con sus nacientes en el macizo central de Los Andes, que limita con Chile, siendo sus principales tributarios los ríos Cobre y Tordillo. Posee un régimen hidrológico casi exclusivamente nival y su caudal medio anual es de 111 $m^3.s^{-1}$. Por su parte, el río Barrancas nace también en la cordillera de los Andes, aproximadamente a los 36 ° 05' de latitud Sur, en proximidades de las lagunas Negra y La Fea, y fluye sobre el límite interprovincial entre Mendoza y Neuquén. El régimen hídrico del río Barrancas se constituye como una transición entre nival, hacia el norte de la cuenca, y pluvio-nival hacia el sur de la misma. Su caudal medio anual se calcula en 36,6 $m^3.s^{-1}$, variando entre un mínimo diario de 12 $m^3.s^{-1}$ en períodos de estiaje y llegando próximo a los 134,3 $m3.s^{-1}$ en épocas de intenso deshielo (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública, 2013). Los ríos Grande y Barrancas aportan la mayor proporción del volumen de agua que en parte escurre superficialmente por el río Colorado y en parte se infiltra en las zonas de recarga alimentando el acuífero regional.

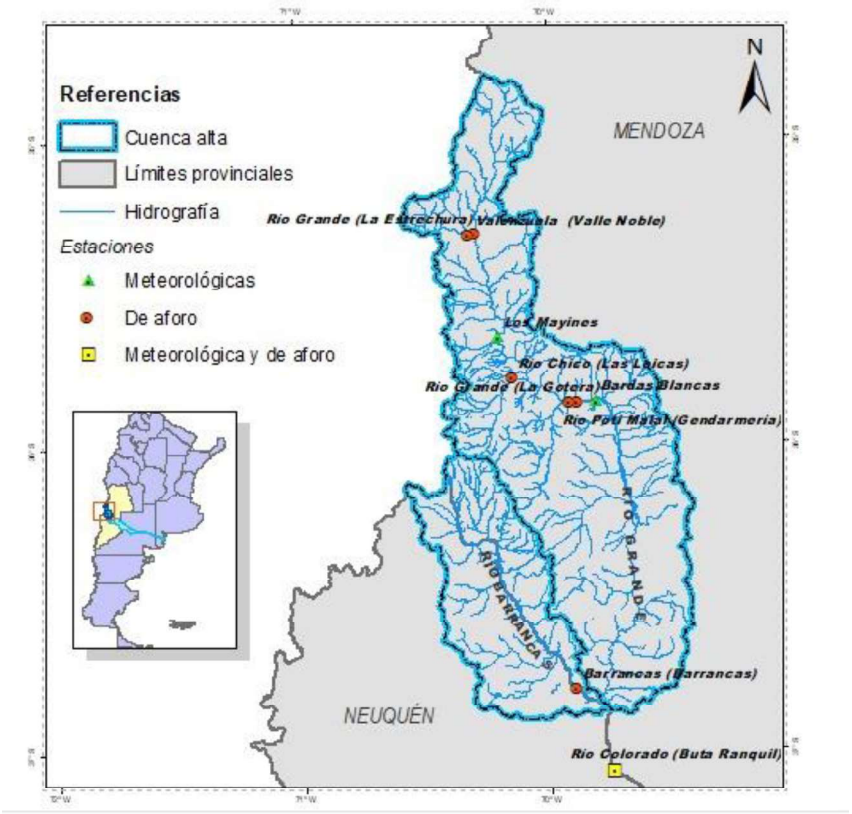


Figura 1. Mapa de ubicación área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recopilaron registros de caudal de 7 estaciones de aforo (Tabla I) y de precipitación de 3 estaciones meteorológicas (Tabla II) en las subcuencas de los ríos Grande y Barrancas, para el período 1991-2021. Los datos fueron descargados de la Base de Datos Hidrológica Integrada a cargo de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Se realizó un análisis estadístico descriptivo mediante Infostat (Di Renzo *et al*., 2008) de los caudales mensuales y anuales, obteniendo los parámetros de máximo, mínimo, desvío estándar y tendencias de cada estación y parámetro evaluado.

Tabla I. Ubicación de estaciones hidrológicas.

Cuenca	Rio	Estación	Ubicación
Grande	Poti Malal	Gendarmería	
	Valenzuela	Valle Noble	35°19'27.00"S 70°18'40.00"O
	Grande	La Gotera	35°52'13.00"S 69°53'0.44"O
	Chico	Las Loicas	35°47'32.15"S 70° 8'29.50"O
	Grande	La Estrechura	35°19'11.78"S 70°17'15.26"O
Barrancas	Barrancas	Barrancas	36°48'24.76"S 69°53'35.37"O
Colorado	Colorado	Buta Ranquil	37° 4'34.23"S 69°44'47.61"O

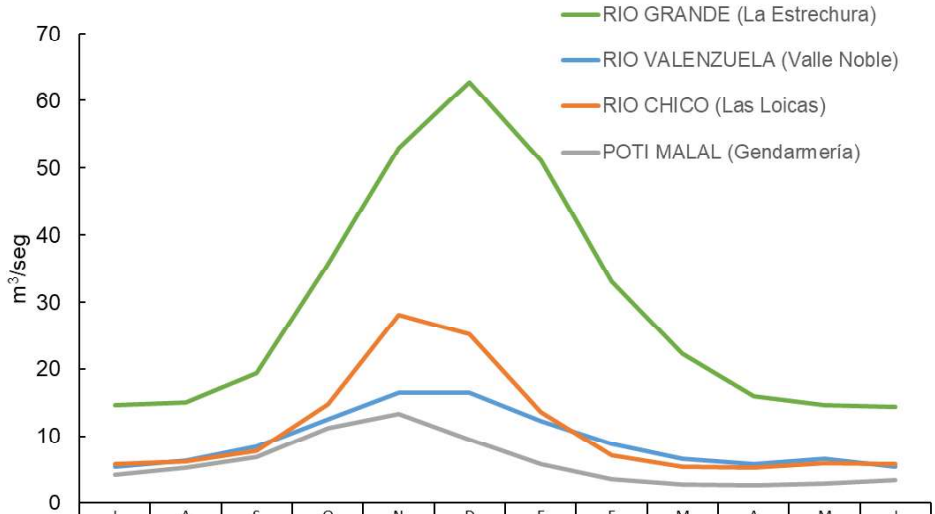
 ISBN: 978-987-1323-89-0

Tabla II. Ubicación de estaciones meteorológicas

Cuenca	Estación	Ubicación
Grande	Los Mayines	35°39'21.80"S 70°12'4.00"O
	Bardas Blancas	35°51'59.00"S 69°48'44.00"O
	Buta Ranquil	37° 4'34.23"S 69°44'47.61"O

RESULTADOS

A partir del análisis realizado, pudo observarse que los mayores caudales se presentan en los meses de primavera, y los menores caudales se registran en los meses de otoño. Por otra parte, puede indicarse que las mayores variabilidades se registran en las estaciones de primavera y verano. En la Figura 2 se observan los caudales de las estaciones de aforo ubicadas íntegramente en la subcuenca del río Grande. La estación La Estrechura registra los mayores valores con un pico en el mes de diciembre para la serie analizada.



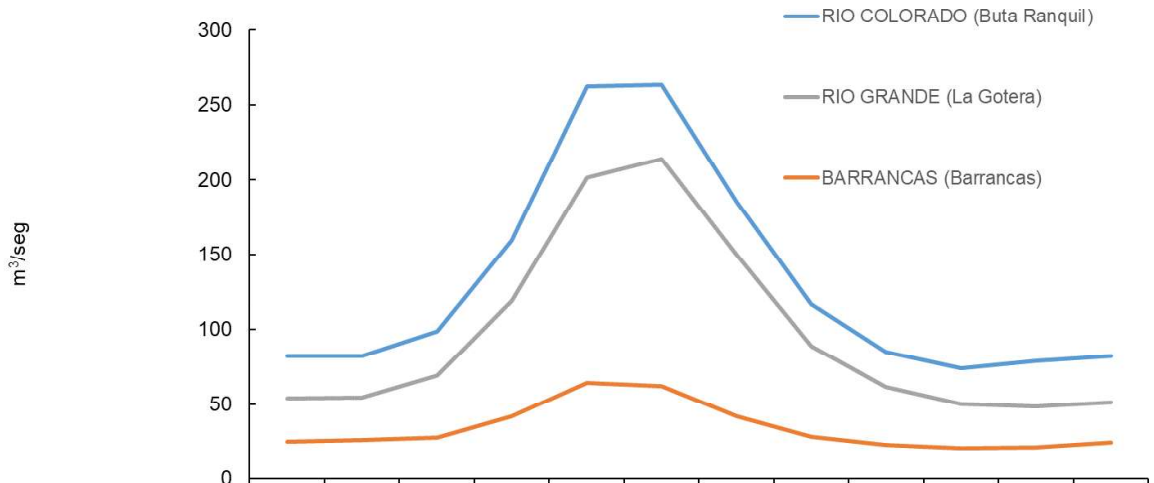
	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J
RIO GRANDE (La Estrechura)	14,69	15,06	19,49	35,72	53,02	62,81	51,21	33,16	22,28	15,98	14,75	14,45
RIO VALENZUELA (Valle Noble)	5,53	6,40	8,53	12,62	16,56	16,55	12,26	8,88	6,69	5,88	6,60	5,44
RIO CHICO (Las Loicas)	5,9	6,3	7,9	14,8	28,1	25,2	13,7	7,2	5,5	5,3	6,0	5,9
POTI MALAL (Gendarmería)	4,2	5,3	7,0	11,3	13,4	9,6	5,9	3,7	2,8	2,7	2,9	3,5

Figura 2. Caudal medio mensual correspondiente a la serie 1991-2021.

En la Figura 3 se observan los caudales para tres de las estaciones de aforo representativas de cada subcuenca, así como la estación Buta Ranquil aguas abajo de la confluencia de los afluentes principales. El régimen hídrico del río Colorado se caracteriza como fuertemente estacional, con crecidas que se presentan en el período octubre/marzo, siendo el río Grande el mayor afluente. Se identifica que del caudal total del río Colorado un 71 % corresponde al aporte del río Grande y el restante al río Barrancas.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

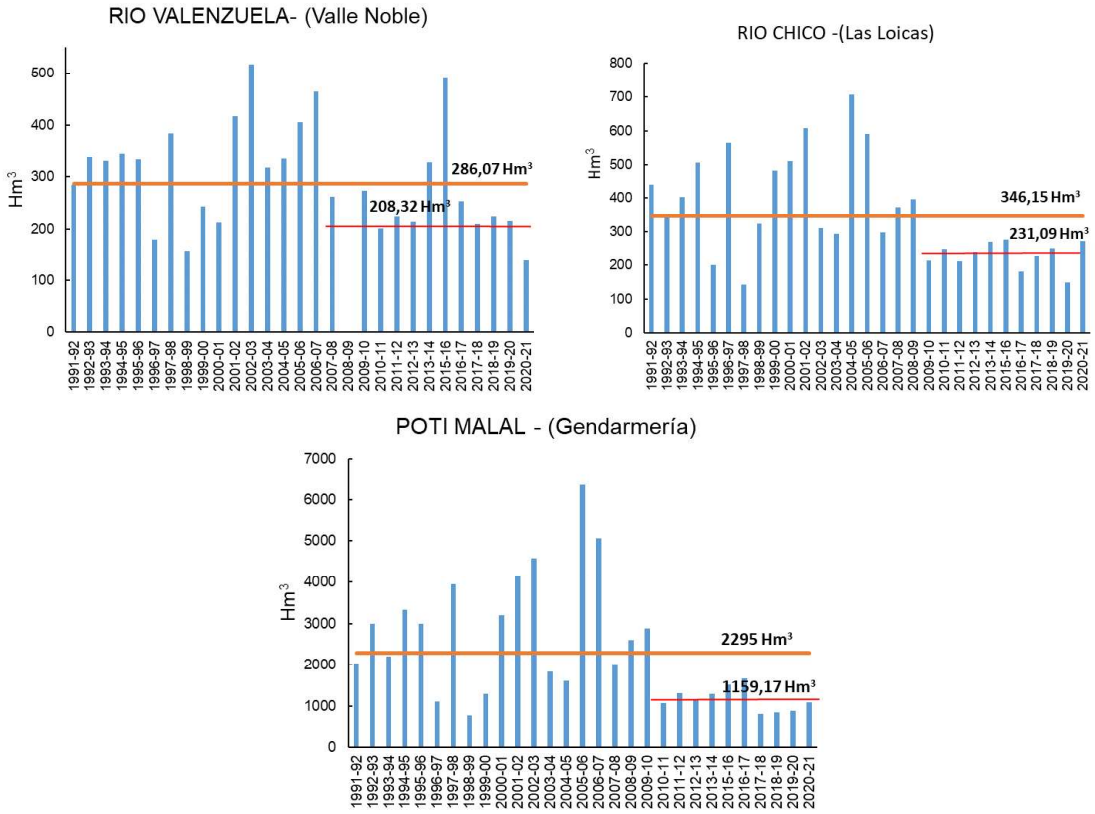
.



	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J
RIO COLORADO (Buta Ranquil)	82,4	82,4	98,6	159,2	262,4	263,5	184,9	116,9	84,7	73,8	78,9	82,1
RIO GRANDE (La Gotera)	53,9	54,3	69,3	118,7	201,5	213,8	149,4	89,1	61,2	49,9	48,5	51,1
BARRANCAS (Barrancas)	25,0	26,1	27,6	42,0	64,5	62,0	42,0	28,3	22,6	20,7	21,1	24,2

Figura 3. Caudal medio mensual correspondiente a la serie 1991-2021.

Respecto a los derrames, por la margen derecha, el rio Valenzuela, Chico y Poti Malal son afluentes del río Grande, presentando el mayor aporte Poti Malal (Figura 4). El río Valenzuela presenta mayor variabilidad en los derrames anuales de los últimos años, pero en el rio Chico y Poti Malal puede observarse claramente la disminución en los derrames anuales en los últimos 11 años, presentando un derrame del 66 % para el río Chico y 50, 5% para Poti Malal.



 ISBN: 978-987-1323-89-0

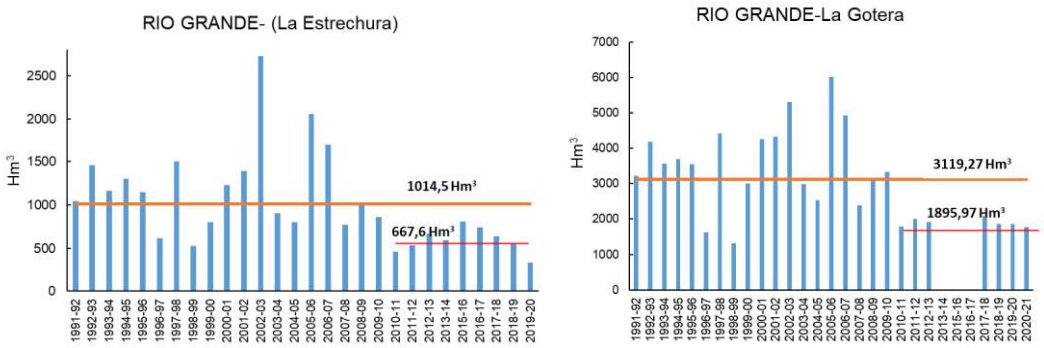


Figura 4. Derrames anuales para estaciones de aforo en la cuenca del río Grande. Promedio histórico (1991-2021) y de los últimos años (periodo seco).

Por su parte, en la subcuenca del río Barrancas se cuenta con una sola estación de aforo (Figura 5), sobre la cual se registra un derrame anual de 1077,8 Hm^3. También se registró durante los últimos 10 ciclos hidrológicos consecutivos derrames por debajo de su promedio, el cual representa el 68 % de su promedio histórico.

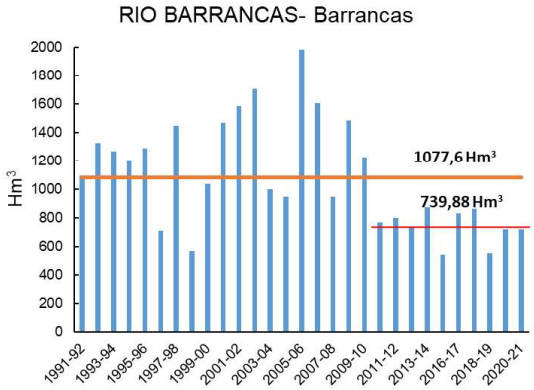


Figura 5. Derrame anual para la estación de aforo en la cuenca del río Barrancas. Promedio histórico (1991-2021) y de los últimos años (periodo seco).

En la figura 6 se observan los derrames en la estación Buta Ranquil, primera estación de aforo luego de la confluencia de los ríos Grande y Barrancas. Puede observarse la misma situación que en la estación antes descripta, presentando en promedio un derrame que corresponde al 65 % del promedio histórico.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

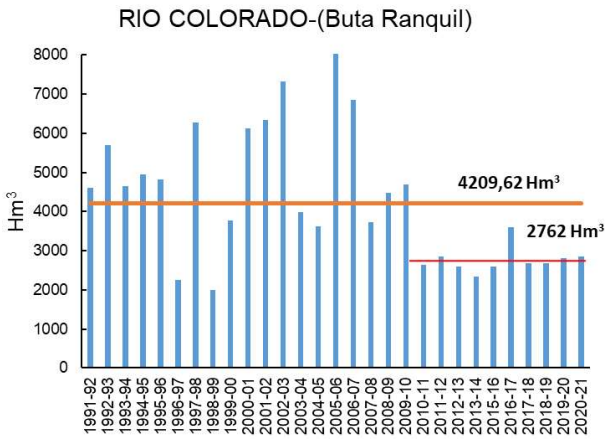


Figura 6. Derrame anual en estación de aforo Buta Ranquil aguas debajo de la confluencia del río Grande con río Barrancas. Promedio histórico (1991-2021) y de los últimos años (periodo seco).

En todas las estaciones analizadas puede observarse una tendencia negativa en el derrame, con volúmenes por debajo de su promedio en los últimos 9-10 años de análisis, según el caso. En promedio se registraron derrames que representan el 64 % de los derrames históricos para la cuenca alta del río Colorado.

Del análisis de los datos de estaciones meteorológicas de la cuenca alta del río Colorado, se puede enunciar que la mayor precipitación mensual ocurre en el período invernal, siendo el mes de junio con el mayor registro en las 3 estaciones analizadas (Figura 7).

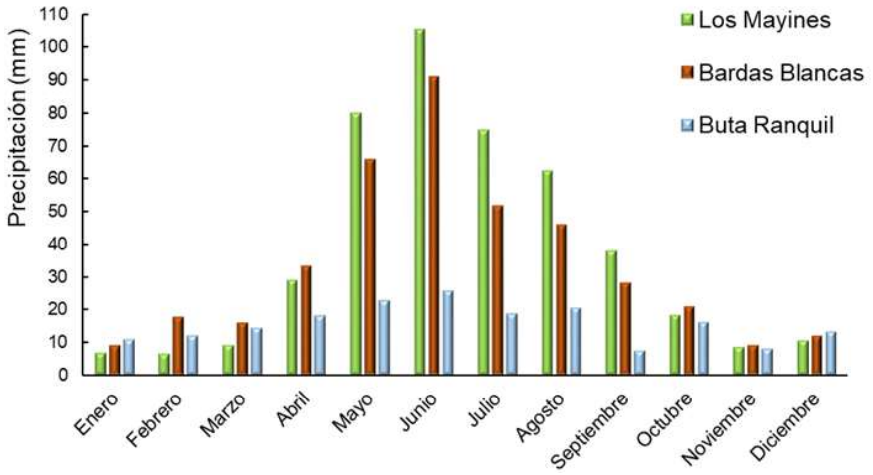


Figura 7. Precipitaciones promedios mensuales para las estaciones Los Mayines, Bardas Blancas y Buta Ranquil para el período 1991-2021.

En la siguiente figura puede observarse la precipitación total anual para las estaciones de Los Mayines, Bardas Blancas y Buta Ranquil. El promedio de precipitación total anual es 431,24 mm, 356,76 mm y 183,29 mm respectivamente. Se identifica una clara tendencia negativa de las precipitaciones que se inicia aproximadamente en el año 2010 y persiste hasta la actualidad (Figura 8).

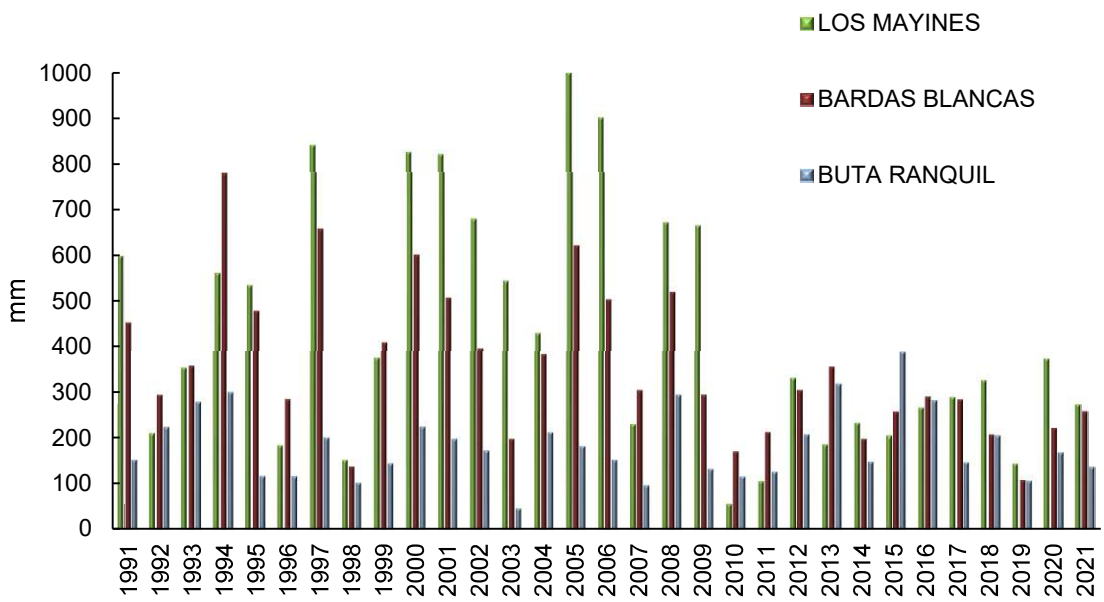


Figura 8. Precipitación total anual para las estaciones Los Mayines, Bardas Blancas y Buta Ranquil para el periodo 1991-2021.

CONCLUSIONES

Si bien los análisis estadísticos realizados sobre los datos hidrometeorológicos en la cuenca son concluyentes y coincidentes con las tendencias generales para Andes Centrales de las publicaciones recientes, es necesario profundizar el estudio de la variabilidad de la oferta hídrica en toda la Cuenca del río Colorado, incluyendo otras variables de medición en la cuenca como el equivalente en agua de nieve.

Además, es importante avanzar con nuevas herramientas y fuentes de información, que nos permita generar información calificada y actualizada de la oferta y demanda de agua en la cuenca del Colorado a los tomadores de decisión para un mejor aprovechamiento del recurso en un marco de sustentabilidad y de gestión integrada del recurso.

REFERENCIAS

ADB (Asian Development Bank). 2013. Thinking about Water Differently: Managing the Water-FoodEnergy Nexus. Asian Development Bank. Disponible en: https://www.adb.org/publications/thinking-aboutwater-differently-managing-water-food-energy-nexus

Boninsegna, J., Villalba, R. 2006. Los condicionantes geográficos y climáticos. Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan. Primer informe a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 19p.

Boninsegna, J., Llop, A. 2015. Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principals ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. La economía del cambio climático en la Argentina. CEPAL - Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 161.67 p.

COIRCO (Comité Interjurisdiccional del Río Colorado). Perl, J. E., Andrés, F. O. 2015. Presentación: Manejo Integral de La Cuenca Del Río Colorado. Oferta y Demanda Hídrica En Períodos de Sequía. En: Jornada de Actualización "Cuenca del río Colorado: Situación Actual, Proyectos en Ejecución, Planificación". Villa Casa de Piedra, La Pampa. Disponible en: www.coirco.com.ar

Di Rienzo, J.A, Casanoves, F, Balzarini, M.G, Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. 2008. InfoStat, versión 2008.

Fuentealba, M., Bahamóndez, C., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O. y Latorre, C. 2021. The 2010-2020 'megadrought' drives reduction in lakes surface area in the Andes of central Chile (32° - 36°S). *Journal of Hydrology. Regional Studies* 38.

Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M. 2017. The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 (12), 6307–6327.

Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública. 2013. Diagnóstico Integrado y escenarios de futuro de la región y la cuenca del río Colorado. Programa de fortalecimiento institucional. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado. Disponible en: http://consorciohidraulico.com.ar/userfiles/RC1-pla.pdf.

Rivera, J. A., Marianetti, G., Scaglione, M. 2021. "Análisis de los eventos de precipitación que afectan la distribución de agua potable en el Gran Mendoza, Argentina". *Cuadernos Geográficos* 61(2):204–22.

Weber, J., Tarrab, L., Rojas, J., Liendo, L. y Paoli, H., 2005. Influencia de la geometría en la predicción de la distribución de velocidades en cauces naturales - Caso Río Colorado. En: Farias, H., Brea, J. y Cazeneuve, R (eds). Ríos 2005: Principios y Aplicaciones en hidráulica de Ríos. Segundo simposio regional sobre hidráulica de ríos. Neuquén, Argentina.

HIDRODINÁMICA DE UN SISTEMA ACUÍFERO CON CONFINAMIENTO EN ÁMBITO DE LA CAÑADA DE JEANMARIE, LLANURA PAMPEANA. CÓRDOBA, ARGENTINA

Barra, C.[a,b], Cabrera, A.[b], Blarasin, M.[b]

[a]*Departamento de Geología, FCEFQyN Universidad Nacional de Río Cuarto ARGENTINA.*
[b]*Comisión Nacional de Actividades Espaciales, ARGENTINA*

e-mail: cbarra@conae.gov.ar

RESUMEN

Las inadecuadas aptitudes geoquímicas del agua del acuífero libre en el noreste cordobés, inhabilita su uso para cualquier fin y promueve la explotación intensiva de acuíferos confinados más profundos que adquieren, en numerosas ocasiones, relevancia por poseer aguas de mejor calidad, debido a sus características hidrolitológicas y por ser menos vulnerables a la contaminación. Este es el caso del Sistema Acuífero Confinado B (SAC B) cuyos parámetros físico-químicos, si bien no lo hacen idóneo para riego ni consumo humano, presentan excelentes condiciones para consumo animal convirtiendo así a la zona en una de las cuencas lecheras más importantes del país. Se considera importante un estudio del recurso que permita reunir evidencias hidrolitológicas y geomorfológicas para contribuir a una mejor comprensión del comportamiento hidrodinámico en la región de manera de generar bases para un mejor uso y manejo del recurso evitando así los conflictos de uso propios de la región. El SAC B, alojado entre los 80-150 m de profundidad, es de sedimentos arenosos, con techos y bases de materiales más impermeables que le otorgan confinamiento variable. Está conformado por las denominadas arenas Puelches, de origen fluvial, de grano fino a muy fino, cuarzosas, subredondeadas y bien seleccionadas, cuyo techo es una capa de arcillas varicolores, que le otorgan confinamiento variable. El flujo subterráneo es SO-NE al sur del área, con gradientes hidráulicos de 0,10%, y al llegar a los bañados/cañadas, cambia de dirección al N y reduce el gradiente. La laguna Mar Chiquita es zona de descarga regional del sistema, por lo que en ese ámbito se observan áreas de surgencia con alturas promedio de 2 m sobre el terreno. Se registran descensos en el nivel piezométrico del SAC B de hasta 20 m en los últimos 50 años, debido a la sobreexplotación y al derroche provocado por perforaciones permanentemente abiertas y abandonadas en zonas de surgencia. Los largos tiempos de residencia y una menor posible recarga anual debe ser investigada, con el fin de definir la sustentabilidad de uso de estas capas con confinamiento.

Palabras Clave: Hidrodinámica, Hidrogeología, SAC B, Puelche, Acuífero.

INTRODUCCIÓN

Según la UNESCO (2020), el aumento de la población mundial y, por lo tanto, el aumento del consumo de agua dulce que trae aparejado (que ha triplicado las extracciones de agua en los últimos 50 años), es el principal responsable de la presión ejercida sobre los recursos hídricos. Este incremento en el consumo, en gran parte, se debe a la alta demanda de alimentos desde los años ´70 y al continuo crecimiento de economías basadas en la agricultura. Según Foster (2012) la agricultura en todo el mundo es el mayor usuario de agua subterránea, lo que ha generado una importante dependencia en las economías de estos recursos. UNESCO estima que, en las últimas décadas, la demanda industrial y la doméstica de agua, principalmente en países en desarrollo, aumentará mucho más rápidamente que la demanda agrícola, aunque el sector agrícola seguirá siendo el principal consumidor

de agua en el mundo. La ONU (WWAP, 2019) en el Programa para el Desarrollo Sustentable 2030 manifiesta la necesidad de un mayor conocimiento de los sistemas de aguas subterráneas que permitan mejorar sustancialmente la gestión de los recursos hídricos.
En la provincia de Córdoba, si bien el agua del acuífero libre es la de mayor importancia socioeconómica porque es la más utilizada por una gran parte de la población rural, en numerosas ocasiones su aptitud para distintos usos puede verse afectada por su composición química natural o por aquella derivada de compuestos químicos (NO_2^-, NO_3^-, pesticidas, etc.) y/o microorganismos, indicadores de contaminación por impacto de las actividades humanas. Por estos motivos el Sistema Acuífero Confinado B (SAC B) adquiere relevancia por poseer agua de mejor calidad debido a sus características hidrolitológicas y por ser menos vulnerable a la contaminación (Blarasin *et al*., 2014; Aguirre, 2019), razón por la cual es muy utilizado en el ámbito rural principalmente con fines agrícolas y pecuarios. Según el Censo Nacional Agropecuario (2018), la zona está ubicada en una de las cuencas lecheras más grandes del país, por lo que la actividad tambera también es gran explotadora del SAC B con enormes volúmenes diarios de agua usada para lavado del predio y enfriamiento de la leche mediante placas. Derivada de la actividad anterior, existen numerosas fábricas de productos lácteos, en su mayoría exportadoras a todo el país y productoras a gran escala, por lo que su actividad consume un alto porcentaje de este recurso. El uso de esta agua para consumo humano no está recomendado (CAA, Capítulo XII, Art. 982) y todas las localidades y ciudades dentro del área de estudio abastecen a su población con el acueducto proveniente de perforaciones ubicadas fuera del área de estudio. Sin embargo, un número muy pequeño de población rural se abastece de este acuífero para consumo humano.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la llanura Chaco-Pampeana Argentina, en un sector de la planicie fluvio eólica oriental del noreste de la provincia de Córdoba (Figura 1) cuyo eje es la depresión llamada Cañada de Jeanmarie. El área se sitúa entre las localidades de Miramar al norte, El Fortín al sur, El Tío al oeste y Devoto al este y abarca una superficie aproximada de 7.000 Km^2, ocupando casi en su totalidad el departamento de San Justo. Si bien la zona seleccionada no es una cuenca hidrográfica típica como la unidad de estudio más utilizada en investigaciones hidrogeológicas, ha sido seleccionada porque, a pesar de que se encuentra en un área de llanura, presenta singularidades geomorfológicas, hidroestratigráficas, hidrodinámicas y geoquímicas, cuyo estudio de detalle será de utilidad para comprender las diversas posibilidades de abastecimiento de agua para las múltiples actividades que se desarrollan en la región (Blarasin et al., 2014; Aguirre, 2019).

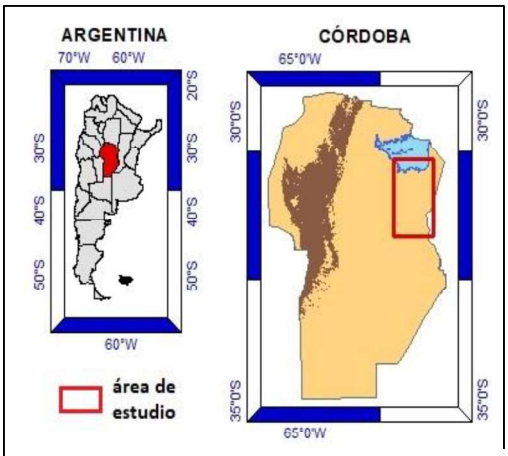


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

En el área de estudio, la explotación y el uso del SAC B es de carácter intensivo y se consumen 145,41 Hm^3/año (145.413.000.000 L/año), de los cuales el 87 % se destina, directa o indirectamente, al abastecimiento de los numerosos tambos y fábricas de productos lácteos presentes en la zona. Según la cantidad de cabezas de ganado bovino en la zona (Censo Nacional Agropecuario, 2018) y el consumo diario de agua de cada animal (Bavera, 2001), se calcula que un 12 % del total del agua explotada se destina para este fin. El 1 % restante se destina para distintos fines: consumo humano localizado, dilución

con agroquímicos y dilución en estercoleras, son las más comunes. Este cálculo no contempla las numerosas perforaciones en zonas de surgencias que actualmente se encuentran abandonadas, pero abiertos creando lagunas a su alrededor desde hace años.

HIDROMETEOROLOGÍA

La precipitación media anual para el periodo 1926-2022 en la zona estudiada varía desde el suroeste, con 947 mm, al norte con 976 mm (Figura 2). Con respecto al régimen térmico, el promedio anual de temperaturas en la zona para el periodo 1973-2022 exhibe un aumento progresivo a razón de 0,11 °C/año con medias anuales de 17,8 °C en 1973 y 20,2°C en 2022 (Barra, 2021).

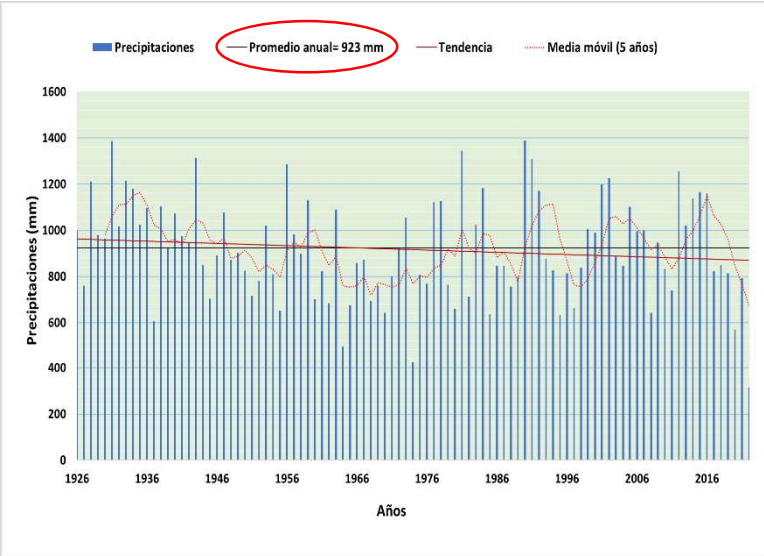


Figura 2. Promedio anual de precipitaciones, periodo 1926-2022 en la localidad de Alicia.

La evapotranspiración potencial ha sido estimada en toda la zona en un valor medio anual de 876 mm (Barra, 2021), lo que genera valores variables en la evapotranspiración real desde el suroeste donde predominan los déficits hídricos, y el sector norte donde predominan los excesos. Estas diferencias resultan en variaciones climáticas desde sub-húmedo-seco en el suroeste y sub-húmedo húmedo en el norte. Sin embargo, en los balances hídricos seriados realizados en toda la zona, muestran que ocurren excesos en toda el área de estudio, especialmente en épocas de mayores precipitaciones.

GEOLOGÍA

El área de estudio corresponde a la cuenca sedimentaria Chaco Paranaense que integra la provincia geológica Llanura Chaco Pampeana (Russo *et al.*, 1979). La sucesión sedimentaria total muestra, aún a escala regional, diferentes fosas tectónicas, que confieren al basamento una forma de grandes cubetas separadas por altos o dorsales (Caminos *et al.*, 1999). La cubierta sedimentaria cenozoica comienza en el Eoceno-Mioceno inferior donde se depositan sedimentitas continentales, acumuladas en una extensa llanura aluvial de baja energía, compuesta principalmente por intercalaciones de arcillas y delgadas capas de arena color rojizo, con cantidades variables de yeso asignadas al Gr. Chaco que, durante el Mioceno medio, fueron invadidas por la transgresión marina, denominada Paranaense, dejando un registro transgresivo (Fm. Paraná). Durante el Mioceno medio superior se deposita la Fm. Santiago Temple, constituida en su mayor parte por arcillitas limosas de color rojo a pardo, que se depositó coetáneamente con dos formaciones: Fm. Paraná (C.A.A.A.S, 1973) y Fm. Ituzaingó (Santa Cruz, 1972). Particularmente, en el área de estudio, la Fm. Ituzaingó se encuentra suprayaciendo a la Fm. Paraná y, en el techo, apoyados en discordancia, se depositaron materiales predominantemente eólicos que fueron agrupados bajo la denominación de Fm. Pampeano (Cantú, 1992; Piovano *et al.*, 1992).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

GEOMORFOLOGÍA

Geomorfológicamente, se clasificó la zona según la terminología de Iriondo (1987), Degiovanni *et al*. (2005) y Carignano *et al*. (2014) (Figura 3). La llanura fluvio-eólica deprimida es un relieve muy suave con gradientes regionales hacia el este que no superan el 0,3%, es una morfo-estructura de carácter regional que se extiende al norte y sur de la zona de estudio y queda definida por dos megafracturas ubicadas al este (Falla Tostado Selva) y al oeste (fuera del área estudiada), segmentada por estructuras secundarias en diferentes subambientes.

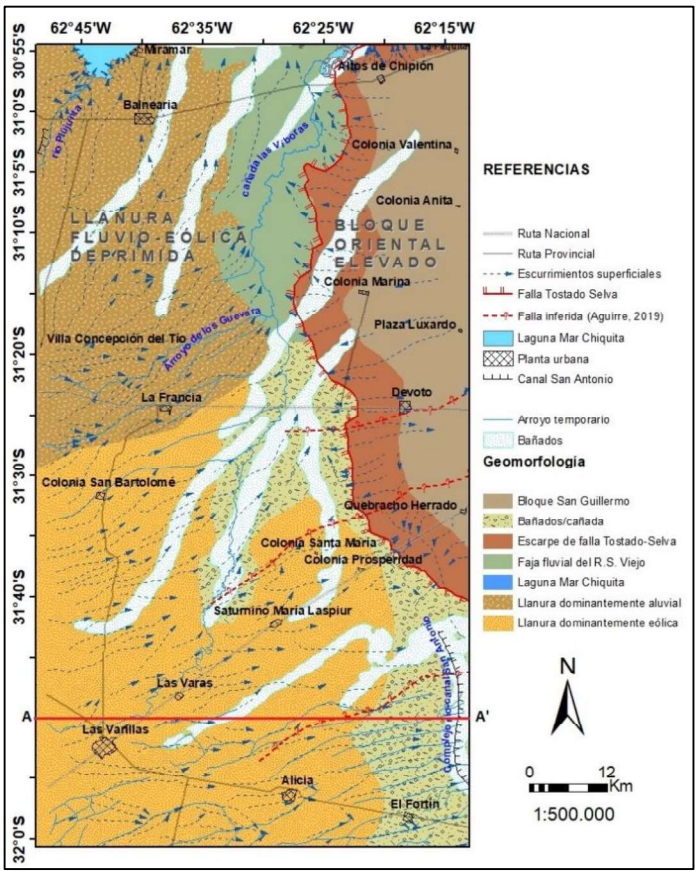


Figura 3. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.

La depresión de Tortugas – San Antonio, conformada por la faja fluvial del Río Segundo Viejo y la zona bañados y cañadas, constituye una faja deprimida y alargada con orientación norte-sur, donde se observan los gradientes topográficos más bajos de toda el área de estudio, llegando a valores de 0,03%. El material predominante es loess, aunque también se encuentran sedimentos palustres asociados a llanuras de inundación. Esta depresión, drena sus aguas hacia dos vertientes: principalmente hacia La Laguna Mar Chiquita en el norte, a través de la Cañada de las Víboras y el arroyo Saladillo en forma esporádica.

El Bloque San Guillermo es una morfoestructura elevada, de rumbo norte-sur, limitada por la falla de Tostado-Selva. Este bloque asimétrico y su escarpe de flexura (Bruneto, 2008) están constituidos por materiales loéssicos franco limosos y suelos en general moderadamente bien drenados acorde con las características muy planas del relieve.

HIDROGEOLOGÍA

Las características de los procesos sedimentarios que tuvieron lugar durante el Cenozoico han influido en la disposición y geometría (espesor y extensión areal) y en las características sedimentológicas (tamaño de grano, diagénesis, etc.) de las diferentes capas acuíferas, aspectos que condicionan su comportamiento hidráulico y geoquímico (Blarasin *et al.*, 2014).

En una síntesis hidroestratigráfica de la llanura cordobesa al este de las Sierras Pampeanas se han identificado las principales unidades hidrolitológicas y su relación con las formaciones geológicas más reconocidas (Barra, 2021). En el esquema hidroestratigráfico regional (Figura 4), los sedimentos que constituyen el acuífero libre son cuaternarios, de origen continental (eólico, fluvial, en forma muy subordinada palustres), conocidos como sedimentos Pampeanos y Postpampeanos (Blarasin *et al.*, 2014). Este acuífero se extiende hasta aproximadamente los 60 m de profundidad.

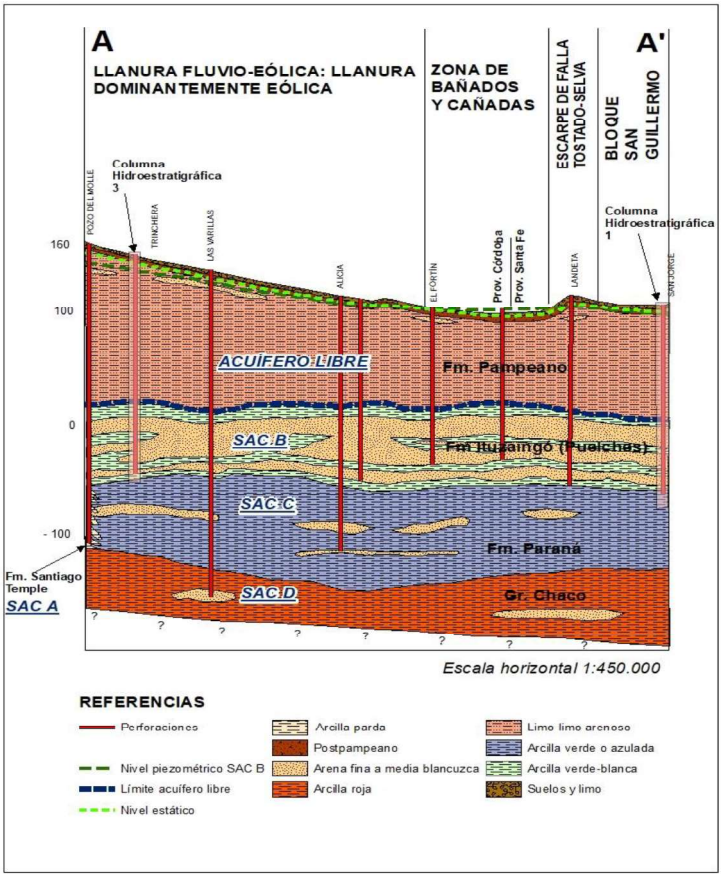


Figura 4. Perfil hidrogeológico de la sección A-A' que se señala en la Figura 3.

Los acuíferos confinados se ubican por debajo de los 80 – 150 m de profundidad, son de sedimentos arenosos y areno-gravosos, con techos y bases de materiales más impermeables que le otorgan confinamiento variable. El más conocido, y más somero del área, ya que se lo alcanza a los 80 m de profundidad en algunas zonas, y motivo de las investigaciones hidrodinámicas que se presentan en este trabajo, es el acuífero conformado por las llamadas "arenas Puelches" (Sistema Acuífero Confinado B o SAC B), compuesto por arenas medias a finas de origen fluvial, cuarzosas, subredondeadas y bien seleccionadas, identificadas y muy explotadas en el este y noreste de Córdoba, cuyo techo es una capa de arcillas varicolores.

A mayor profundidad pueden distinguirse dos ambientes diferentes de sedimentación, de origen continental y marino (Gomez, 1995), en cuyos sedimentos, de edad cuaternaria inferior-neógena superior, se desarrollan acuíferos con mayor grado de confinamiento. Los sedimentos de origen continental se ubican al oeste y reciben el nombre de Fm. Santiago Temple en donde se desarrolla el sistema acuífero confinado A (SAC A, Blarasin *et al.*, 2014). En la parte oriental del territorio provincial yacen los sedimentos correspondientes a antiguas ingresiones marinas correspondiente a la Fm. Paraná que alojan al denominado SAC C (Blarasin *et al.*, 2014). Por debajo de la Fm. Paraná se explotan en algunos sectores capas acuíferas en sedimentos continentales correspondientes al Gr. Chaco, usualmente por debajo de los 200 m de profundidad y el cual ha sido denominado como SAC D (Blarasin *et al.*, 2014).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

METODOLOGÍA

Se realizó un censo de 39 perforaciones mediante una red del inventario de pozos con una densidad adecuada de 1 pozo cada 169 km^2 (secciones de 13 km x 13 km) aproximadamente, en función de la escala (1:500.000), área de trabajo de 7.000 km^2 y las posibilidades de acceso a las mismas. Además, se recabaron antecedentes de 87 perforaciones en el área llevadas a cabo por la empresa Barra Perforaciones. La medición de niveles piezométricos estáticos se efectuó con una sonda piezométrica de señal lumínica y sonora, marca Sollinst. El geoposicionamiento de cada perforación se llevó a cabo con un GPS marca Garmin. Se calcularon potenciales hidráulicos y se elaboró el mapa piezométrico para la zona. Los niveles piezométricos obtenidos fueron comparados con los medidos en 1973 (C.A.A.A.S., 1973) y en 2013 (Aguirre, 2019).
Los parámetros hidráulicos (K, T y S) fueron obtenidos en el campo mediante ensayos de bombeo con un compresor a caudal constante y calculadas con la fórmula de Boulton y la recuperación con la fórmula de Theis. Por último, se aplicó la corrección de Jacob para los descensos.

RESULTADOS

En el mapa de curvas isopiezas del SAC B (Figura 5) se distinguen 3 divisorias de agua, las cuales se encuentran controladas estructuralmente, las dos de mayor jerarquía, dividen cuencas hidrogeológicas. Entre ellas se observan, la coincidente con el Bloque San Guillermo, que bifurca el flujo que va hacia la Laguna Mar Chiquita del que se dirige hacia el este (hacia la provincia de Santa Fe); gotra ubicada al sur del área, de dirección oeste-este que separa las cuencas hidrológicas subterráneas con dos direcciones predominantes: una hacia la Laguna Mar Chiquita al norte y otra hacia el sur y, finalmente, una divisoria ubicada al oeste del área de estudio, de dirección suroeste-noreste.
Los gradientes hidráulicos varían desde 0,10 % especialmente en el sector sur del área de estudio, y a partir de la zona de bañados/cañadas donde el flujo es principalmente hacia el norte, los gradientes se reducen a un 0,05 % hasta llegar a la laguna Mar Chiquita que funciona como zona de descarga regional del sistema (Figura 5).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

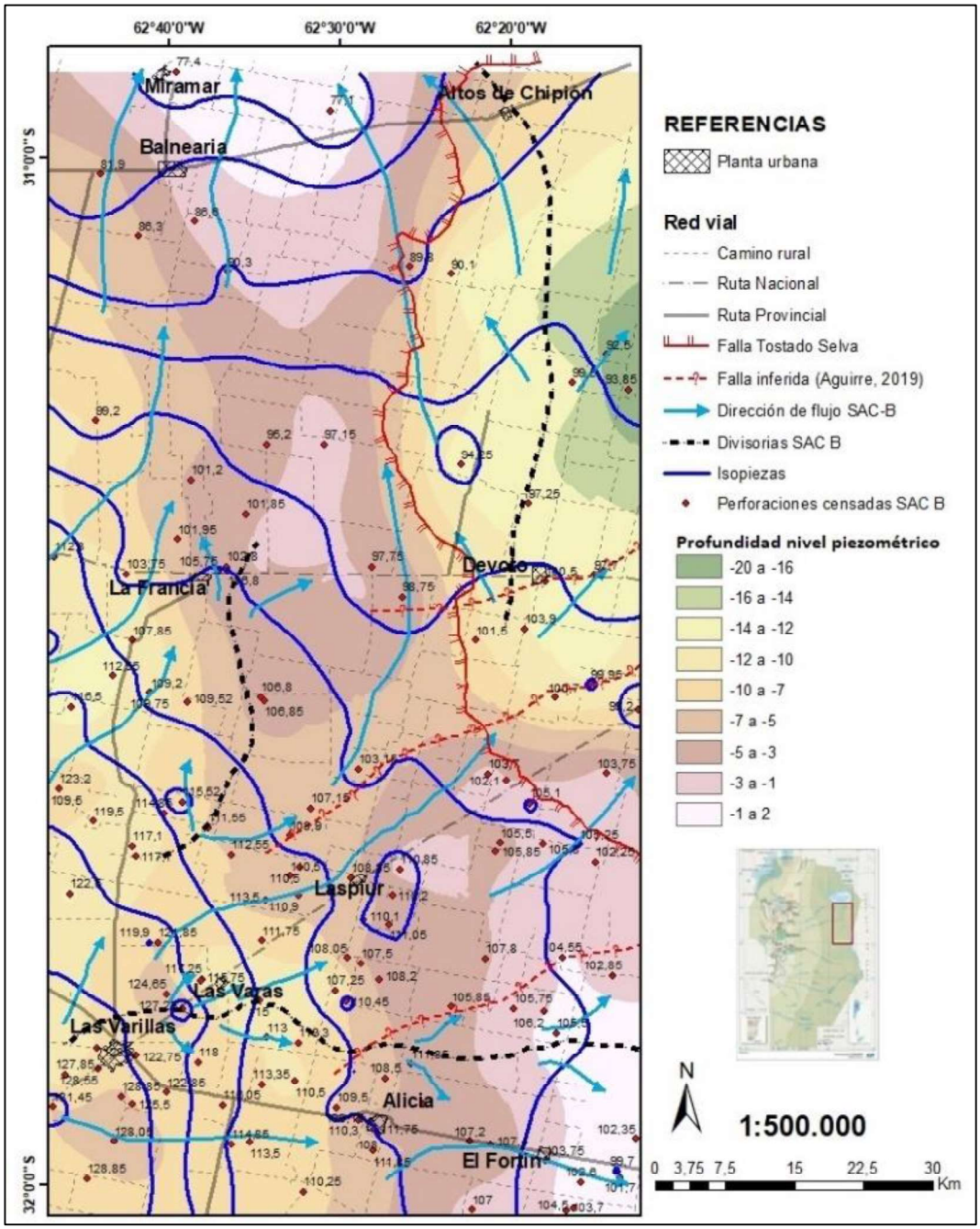


Figura 5. Curvas isopiezas del SAC B (2022).

Los parámetros hidráulicos, como se ve en la Tabla I, permiten tipificarlo como un acuífero que varía desde bueno a muy bueno. Como se ve, su coeficiente de almacenamiento (S) varía en varios órdenes de magnitud: desde 0,01 en la llanura dominantemente aluvial a 0,001 en la llanura dominantemente eólica. Su transmisividad (T) posee valores extremos máximos de 475,5 m^2/d en la pampa elevada sur y un valor extremo mínimo de 50 m^2/d en la llanura dominantemente aluvial. La conductividad hidráulica (K) presenta valores que varían entre 5 y 20 m/d, mientras que el único dato de caudal característico, según el diseño de perforación utilizado, fue en la llanura dominantemente aluvial y resultó de 3200 L/h/m.

Con los valores de gradientes hidráulicos (i) obtenidos del mapa de curvas de isopiezas, los de porosidad efectiva (K) y los de porosidad efectiva (m_e), se calcularon las velocidades reales de flujo subterráneo del SAC B para las distintas unidades geomorfológicas.

Tabla I. Parámetros hidráulicos del SAC B en las distintas unidades geomorfológicas. El bloque oriental se subdividió en sectores norte y sur. m_e= extraído de Brassington (2007) y Custodio y Llamas, (1983).

Unidad geomorfológica	K (m/d)	S	T (m^2/d)	m_e	i	Vr (m/d)	Vr (cm/d)
Llanura aluvial	5	0.01	50	0.23	0.001	0.02	2.17
Llanura eólica	7	0.001	60	0.23	0.001	0.03	3.04
Bloque oriental elevado S	15-20	0.0067	475.5	0.23	0.0005	0.04	3.70
Bloque oriental elevado N	17	0.0023	177	0.23	0.0005	0.04	3.70

En el mapa de la Figura 5, se encuentran remarcadas en blanco las áreas de surgencia, una en la zona litoral de la laguna Mar Chiquita con alturas promedio de 2 m sobre el nivel del terreno, y otra área más pequeña en la localidad de El Fortín y alrededores, con alturas de surgencia promedio de 1,5 m.

Comparando los valores de los niveles piezométricos obtenidos en el año 1973 (C.A.A.A.S., 1973) con los del año 2013 (Aguirre, 2013) (Figura 6), se observan descensos en el Bloque San Guillermo de hasta 23 m, en la llanura fluvio eólica los descensos varían entre 8 y 9 m, y en las zonas más deprimidas del área, como los bañados, cañadas y faja fluvial, se registraron, a diferencia de las áreas indicadas anteriormente, ascensos, aunque variables que pueden llegar hasta 6 m. La situación cambia significativamente cuando se compara la variación de los niveles piezométricos en el periodo 2013-2022 donde se observan, en general, importantes ascensos, por ejemplo, de hasta 20 m en el Bloque San Guillermo, y de hasta 14 m en la llanura fluvio eólica. Para este periodo, se observan algunos descensos al norte del área de estudio y en la zona litoral de la Laguna Mar Chiquita, de hasta 8 m.

En general, el resumen de la variación 1973-2022 resulta en descensos generalizados en toda el área de estudio a excepción de algunos sectores localizados en los alrededores de las localidades de Laspiur, Col. Marina y Altos de Chipión donde se midieron ascensos variables que llegan hasta los 5 m. Importantes descensos de hasta 15 m para el periodo considerado se dan en el sector SO del área de estudio y de hasta 10 m en el NO (Figura 7).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

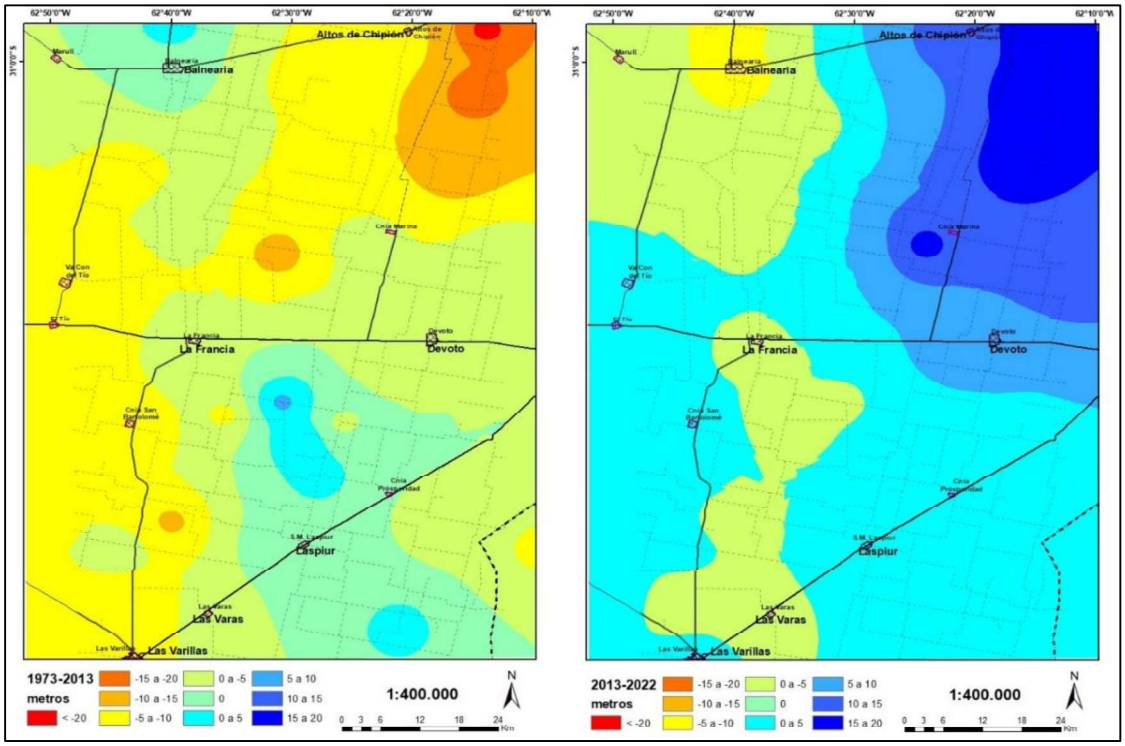


Figura 6. Mapa de diferencias de nivel piezométrico del SAC B. Izquierda: periodo 1973-2013; derecha: 2013-2022.

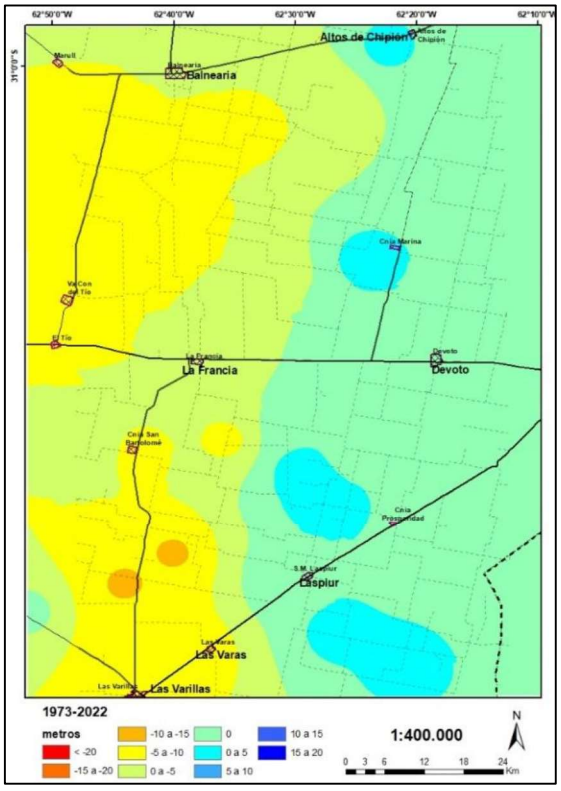


Figura 7. Mapa de diferencias de nivel piezo-métrico del SAC B, periodo 1973-2013.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

CONCLUSIONES

El SAC B se ubica en el área de estudio a profundidades que varían entre 80 y 150 m y está compuesto por arenas productivas de grano fino, cuarzosas, equigranulares y semi-redondeadas, cuyas características hidrogeológicas están condicionadas por la interacción entre la tectónica, la geomorfología y los procesos sedimentarios que condicionaron el medio poroso por el que fluye el agua subterránea y dando como resultado las características hidrodinámicas expuestas.

Los parámetros hidráulicos calculados (T: 5-475,5 m^2/d, K: 5-20 m/d y S: del orden de $1x10^{-3}$) permiten concluir que se trata de un acuífero con buenas características hidráulicas que lo hacen muy productivo, pero con alta susceptibilidad a las variaciones del nivel piezométrico. Los valores del coeficiente de almacenamiento (S) indican que se trata de un acuífero con distintos grados de confinamiento, particularmente en la llanura aluvial en donde representa a un acuífero semiconfinado.

Se observa una relación inversa entre la variación de los niveles piezométricos del SAC B y el régimen de precipitaciones. Por un lado, los años previos al 2013, la zona de estudio se encontraba atravesando un periodo húmedo y, sin embargo, se observa, mayormente, un descenso en los niveles piezométricos. Por el contrario, los ascensos observados entre este ciclo húmedo (2013) y el 2022, muy seco, estaría asociado a una disminución en la explotación del recurso dado los litigios generados por el uso del agua en las últimas décadas, lo que ha limitado las extracciones permitiendo la recuperación de los niveles piezométricos. En los años previos al 2013 es notoria la intensa actividad ganadera a media y pequeña escala distribuida en toda el área de estudio explotando el acuífero mediante una red de pequeñas perforaciones distribuidas en toda la zona. Posteriormente, en los últimos años, se registró un reemplazo acelerado de la actividad ganadera hacia la agrícola, lo que provocó un importante crecimiento de unos pocos productores tamberos y fábricas lácteas que absorbieron a los de menor escala. Esta situación genera actualmente una explotación del recurso, mediante perforaciones de gran caudal, localizada en áreas puntuales, permitiendo la recuperación del nivel piezométrico en aquellos lugares donde sólo se desarrolla la actividad agrícola, la cual no se abastece del SAC B.

REFERENCIAS

Aguirre, M. 2019. Caracterización hidrogeológica, hidroquímica e isotópica ambiental de los sistemas acuíferos del noreste de Córdoba. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto. Inédito. Pp: 232.

Barra, C. 2021. Modelo hidrodinámico y geoquímico de los sistemas acuíferos en el agroecosistema vinculado a la Cañada de Jeanmaire (Córdoba) apoyado en el estudio de isótopos estables y radiactivos. Primer informe de avance doctoral. UNRC. Inédito.

Bavera, G. A., 2001. Manual de Aguas y Aguadas para el ganado. Edit. Hemisf. Sur S.A. ISBN 987-43-2856-8. 387 p.

Blarasin M., Cabrera A. y E. Matteoda. Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. UniRío Editora. (2014).

Brassington R., 2007. Field Hydrogeology. John Wiley & Sons Ltd, England.

Brunetto, E., 2008. Actividad neotectónica en el sector oriental de la cuenca inferior del río Dulce, laguna Mar Chiquita y bloque San Guillermo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, p. 306 (Inédito).

C.A.A.A.S. 1973. Recursos de aguas subterráneas y su aprovechamiento en la llanura pampeana y en el valle del Conlara, Provincias de Córdoba, Santa Fe y San Luis, República Argentina. Convenio Argentino Alemán de Aguas Subterráneas. 6 Tomos. Servicio Geológico de la República Federal de Alemania.

Caminos, R.; Panza, J.; Etcheverría, M.; Pezzutti, N.; Rastelli, D. 1999. Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 29, 796 p. Buenos Aires.

Cantú, M.P., 1992. Provincia de Córdoba. In: Iriondo, M. (Ed.), El Holoceno en La Argentina, Paraná, Argentina, vol. I, pp. 1-16

Carignano, C., Kröhling, D., Degiovanni, S., Cioccale, M. 2014. Geología de Superficie. Geomorfología de Córdoba. Relatorio Congreso Geológico Argentino. Pp: 747-821.

Custodio, E. y M. Llamas, 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol. 1-2350.

Degiovanni, S., M. Villegas, M. Blarasin y G. Sagripanti, 2005. Hoja Geológica 3363-III Río Cuarto. Secretaría de Minería de la Nación.

Foster, S.; Ait-Kadi, M. 2012. Integrated Water Resources Management (IWRM) – how does groundwater fit in ? IAH Hydrogeology Journal 20: 415-418.

Gomez, M. 1995. La formación pampeana en la llanura cordobesa, línea de costa de la ingresión del Entrerriano. Asoc. Arg. de Geol. Apl. a la Ing. Vol. 3: 232-254. San Juan. ISSN 0326 1921.

Iriondo, M., 1987. Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). Dórbignyana 4, 1-54.

Piovano, E., Manzur, A., Pasquini, A. 1992. Análisis paleoambiental de las formaciones aflorantes al oeste de la Ciudad de Córdoba (Cretácico y Cuaternario). IV Reunión Argentina de Sedimentología, Actas III:105-111. La Plata

Russo, A., R. Ferello y G. Chebli. 1979. Llanura Chaco Pampeana. Geología Reg. Argentina.

Santa Cruz, J. 1972. Geología al este de la sierra Chica (Córdoba). Valle del Río Primero. Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba. I (3-4): 102-109. Córdoba.

UNESCO, ONU-Agua. 2020: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.

WWAP (Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos). 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos. París, UNESCO.

ANÁLISIS DE RIESGO HÍDRICO EN LA LOCALIDAD DEL RINCÓN, DEPARTAMENTO POMÁN, PROVINCIA DE CATAMARCA

Solange Barrionuevo Mansilla[a] y Cinthia Lamas[ab]

[a]*Departamento de Geología, FTCA, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA*
[b]*INCoDeG Instituto de Monitoreo y Control de la Degradación GeoAmbiental, FTCA, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA*

e-mail: solangemansilla10@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el riesgo hídrico de la localidad del Rincón ubicada al piedemonte de la Sierra de Ambato, departamento Pomán, provincia de Catamarca. La metodología de trabajo consiste en la búsqueda y recopilación de información del área de estudio, en donde se realizó una descripción geológica-geomorfológica y posterior digitalización de la cuenca que conforma el Río Rincón. El análisis multitemporal y morfométrico se realizaron con las imágenes satelitales proporcionadas por Google Earth, interpretando el comportamiento y dirección del rio en los últimos 20 años. El área se encuentra dentro de la región semiárida, desprovista de materia vegetal y con una mayor concentración de lluvias en épocas de verano, el curso de agua que nace en el flanco occidental de la Sierra de Ambato y desemboca en el Salar de Pipanaco, presenta un comportamiento torrencial y de crecientes estivales, con picos de alta intensidad y corta duración, esta conducta torrencial y aluvional del río Rincón, con elevado aporte de sedimentos en suspensión y arrastre de sólidos, ocasiona actualmente cambios en su dinámica, procesos erosivos en las márgenes del curso y cambios en la geomorfología del área de estudio. Este comportamiento influye negativamente en el poblado ya que este se abastece del agua superficial por medio de cañerías dejando fuera de servicio las captaciones desde el río, como así también a sufrir riesgos por inundación afectando algunas casas y parcelas de cultivos que se encuentran más cercanas al lecho. Cativa (2018). Por lo expuesto en función de la base de datos y análisis realizado se clasifica a la zona como riesgo media-alto. Como medida de mitigación se recomienda una planificación de asentamientos urbanos, colocar muros de contención en los márgenes del caudal y realizar limpiezas en el río para permitir el curso de agua libremente.

Palabras clave: Riesgo hídrico, Análisis multitemporal, Crecientes estivales, Ordenamiento territorial.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el riesgo hídrico de la localidad del Rincón, ubicada al piedemonte de la Sierra de Ambato, departamento Pomán, provincia de Catamarca. (28°13'28.03"S; 66° 8'32.85"O). El estudio contribuirá a la determinación de posibles zonas de geoamenazas hídricas, que conllevará a tomar medidas de mitigación, prevención y que las mismas aporten información valiosa para la realización de asentamientos urbanos.

OBJETIVOS

→ Recopilación de información del área de estudio.

→ Identificar geoamenazas hídricas por medio de imágenes satelitales.

→ Establecer medidas de prevención y mitigación.

UBICACIÓN Y VÍAS DE ACCESO

El Rincón es una localidad de la provincia de Catamarca, perteneciente al distrito de Saujil dentro del departamento Pomán. La localidad se encuentra al pie de la falda occidental de la Sierra de Ambato y para acceder al Rincón desde la Ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca se lo realiza por la Ruta Nacional Nº38, pasando por las Localidades de Coneta, Concepción, Chumbicha, en donde se intercepta con la Ruta nacional Nº60, en el cual se dirige a la Quebrada de la Cebila, posteriormente saliendo de la quebrada se toma la ruta provincial Nº46, esta va en dirección al departamento Pomán. (ver Fig. 1).

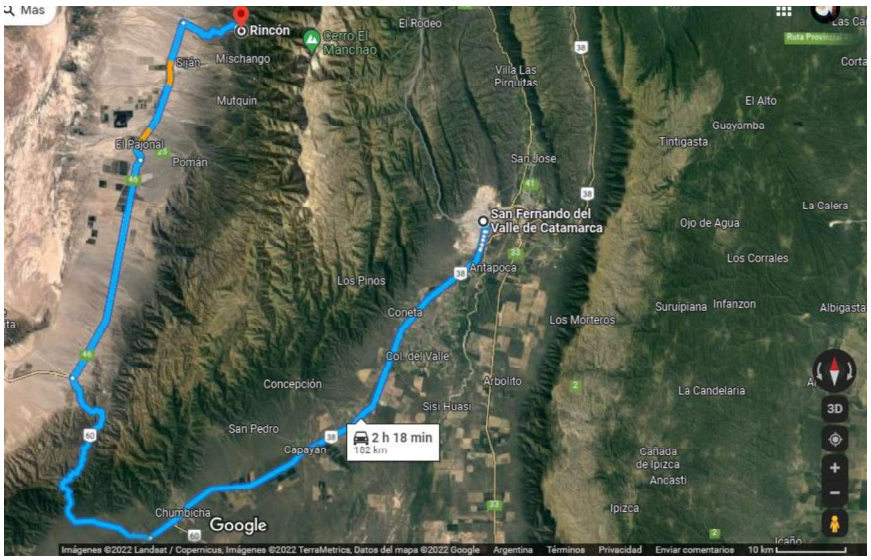


Figura 1. Ubicación y vías de acceso

MARCO GEOLOGÍCO

De acuerdo a la hoja geológica 2966-I de Aimogasta, la geología del área de estudio está conformada por:

- **Formación la Cébila:** En el cual está representada por esquistos, filitas, metacuarcitas y pizarras, esta unidad fue descrita por Gonzales Bonarino, para englobar a rocas metamórficas, también se incluyen las metasamitas que afloran entre el Rincón y Mischango y al SO de la Sierra de Los Ángeles, denominadas como metamorfitas Pomán por Córdoba (1994). Además, se distinguen 3 subunidades litológicas; 1) Metacuarcitas cuarzo-biotitas con nódulos de silimanita. 2) Filitas cuarzo-biotitas-muscovitas con andalucita y escasa silimanita. 3) Micacitas con cuarzo-biotitas-muscovitas-silimanitas inyectadas por venas de cuarzo, microclino y oligoclasa.

De acuerdo a su edad y correlación, la formación La Cébila se sitúa en el precámbrico superior, el bajo grado de metamorfismo de la unidad ha permitido que se conserven muchas de las características texturales de los sedimentos psamo-peliticos originales que habrían sido depositados en una cuenca marina desarrollada sobre el borde pasivo de un cratón, durante el precámbrico superior-cámbrico inferior.

- **Formación Metaformico El Portezuelo:** Aceñolaza y Toselli (1977) agruparon bajo el nombre de Formación El Portezuelo al conjunto de migmatitas y gnesises

que afloran en el sector norte de la Sierra de Ancasti, en el sector del área de estudio está compuesto por migmatitas, gneises y esquistos.

El conjunto de gneises y migmatitas forman una franja regional muy extensa con orientación N-S a lo largo de las Sierras de Ancasti, Ambato, noreste de Velasco y Aconquija. Estas rocas son las más profundas y de más alto grado metamórfico (facies anfibolitas), la edad de esta formación es del Precámrbico superior al cámbrico inferior.

- **Formación Concepción:** Esta unidad corresponde al Pleistoceno superior y fue propuesta por Fidalgo (1965), posteriormente Nullo (1981) utilizo este nombre para agrupar a sedimentos del cuaternario, comúnmente llamados primer nivel de piedemonte, que corresponde a lo que Gonzales Bonarino (1978) señalo como el nivel superior de los depósitos aluviales aterrazados de las sierras de Catamarca y Aconquija. La unidad está conformada por fanglomerados con rodados de gravas medianas a gruesas alternadas con gravillas y arenas. Los sedimentos provienen de la meteorización y posterior transporte de los materiales de las sierras vecinas y están compuestos por rocas pertenecientes al basamento (metamorfico y granítico), siendo la matriz de idéntico origen. Los afloramientos de la ladera occidental de la sierra del Manchao aparecen por encima de los depósitos más modernos y desconectados de la red de drenaje que nace en el área serrana. Según Gonzales Bonarino (1978) corresponden a depósitos de terrazas superior. Su origen se debe a la depositación de sedimentos arrastrados por cursos de agua que bajaban de las sierras por las mismas quebradas que hoy se internan hasta las zonas más elevadas pero que se encontraban en una etapa de menor desarrollo de relieve.

CARACTERISTICAS DEL DEPARTAMENTO POMÁN

El departamento Pomán se encuentra ubicado en la región oeste de la provincia de Catamarca, se extiende desde la Villa de Pomán hasta la localidad del Rincón, situadas en el sector occidental de la Sierra de Ambato. El área corresponde al sector oriental de la cuenca hídrica del Salar de Pipanaco, esta zona presenta un clima predominante árido de sierras y bolsones, con escasas precipitaciones durante el año, concentrándose mayormente en la época estival, ocasionando grandes crecidas de los principales ríos y arroyos que bajan de la Sierra Ambato. (ver Fig. 2). Esta situación natural, puede ser considerada un riesgo geológico. Al desconocer o subestimar estos riesgos naturales y al no considerarlos como parte del ordenamiento territorial, es que ocurren desastres como el aluvión acontecido en la localidad del Sijan en el año 2014, Silvana Cativa (2018).

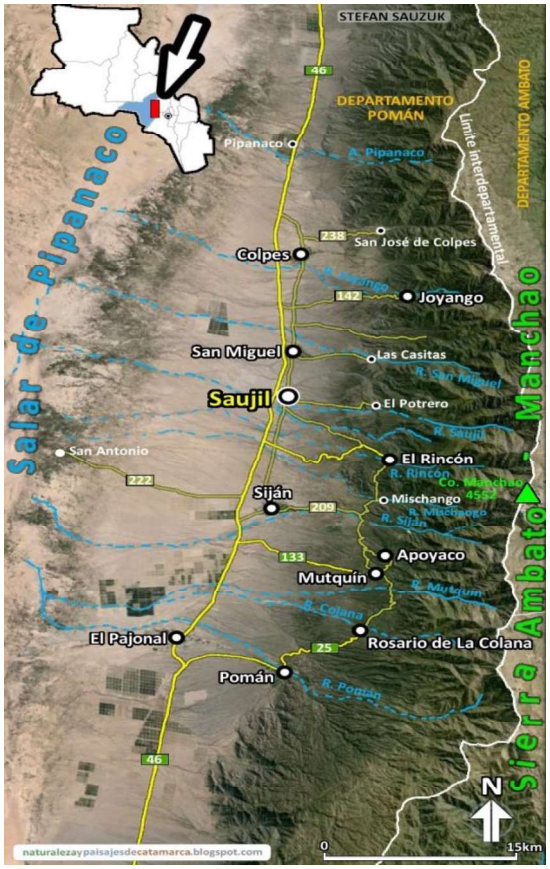


Figura 2. Principales Ríos y arroyos del Departamento Pomán-Fuente: Geografía de Catamarca

METODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El análisis del área de estudio se centra en la localidad del Rincón, ubicada en el Departamento Pomán, en ella se analiza el riesgo hídrico que podría ocasionar una crecida extraordinaria del Rio Rincón, de esa misma forma afectaría a la localidad homónima que se encuentra al piedemonte de la Sierra de Ambato.
De acuerdo al censo 2022 la localidad del Rincón cuenta con más de 600 habitantes y se encuentra a una altitud media de 1.595 m.s.n.m.
El análisis consiste en digitalizar la cuenca que conforma el Río Rincón, realizar un análisis morfométrico, geomorfológico y multitemporal para poder observar a través de imagen satelital proporcionada por Google Earth, como ha actuado el trascurso del rio en los últimos años y tratar de estimar el impacto del riesgo hídrico en la población.

RESULTADOS Y DISCUCIÓN

- **Análisis del área de estudio**

En la Fig. 3.a, se observa la cuenca hídrica del Río Rincón, con la delimitación de su cauce principal y los cursos esporádicos de la misma, esta se ubica en la Sierra de Ambato y en sus cotas más altas se encuentra el Cerro El Manchao con más de 4400 m.s.n.m.
El área de la cuenca es de 29,8 km^2, su perímetro es de 24,4 km y cuenta con una longitud de aproximadamente 9 km (ver Fig. 3.b). Estas mediciones se las realizó de manera directa en Google Earth a partir de la confección de polígono y líneas, con los datos ya representados se sacó el ancho de la cuenca que es de 3,31 km.
Se trata de una cuenca pequeña, generalmente las cuencas pequeñas son sensibles a las lluvias de gran intensidad, extraordinarias y de cortas duraciones, en el cual puede causar

un riesgo para la localidad que se encuentra al final de esta. Según el coeficiente de compacidad o de Gravelius es Oval redonda a oval oblonga por tener 1,26. Su factor de forma es de 0,37, nos indica que es una cuenca de características cortas y que puede estar sujeta a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente crecidas, se encuentra asociada a fuertes relieves y pendientes pronunciados en el terreno ya que su relación de elongación es de 0,68. En cuanto a la pendiente de la cuenca es de 19%, eso significa que el tipo de relieve que la representa es accidentado, la determinación de la pendiente influye mucho a la hora de deducir en cómo será la velocidad del rio cuando ocurran grandes avenidas, la misma se determinó con Global Mapper y Google Earth. (ver Fig. 5).

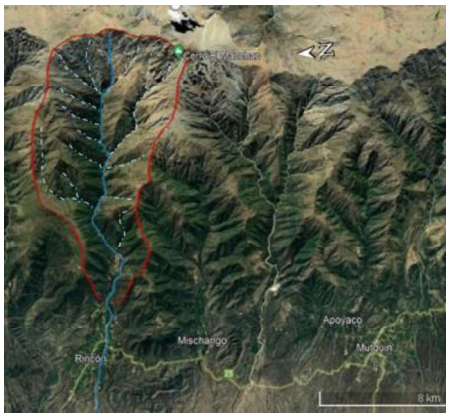
Para el desnivel altitudinal se realizó un perfil en dirección O-E perpendicular a la cuenca, se observó que el punto más alto lateralmente es de 3.340 m.s.n.m y el punto de menor elevación es hacia donde drenan las agua y este alcanza los 2.535 m.s.n.m. (ver Fig. 4 y Tabla I).

El Rio Rincón etimológicamente significa malcasco (aguada de la vuelta o agua que da vuelta). El caudal es permanente, nace en la parte elevada de la sierra y su flujo es en dirección este-oeste. Este rio abastece a la localidad homónima por medio de cañerías y pasa por la misma en forma temporaria. Al cruzar la Ruta provincial Nº46 se une al rio Saujil para perderse en el salar. El rio representa un rumbo general este a oeste. Silvana Cativa (2018).

Estos cursos tienen comportamientos torrenciales y crecientes estivales, con picos de alta intensidad y corta duración. El agua posee cierto grado de turbiedad dado por los elementos de material solido en suspensión y arrastre de material de fondo durante periodo aluvional. El comportamiento influye en el sistema de riego, impactándolo negativamente y dejando fuera de servicio las captaciones del agua por colmatación lo que se refleja en la disminución de la eficiencia del mismo.

Esta conducta torrencial y aluvional de los ríos y arroyos, con elevado aporte de sedimentos en suspensión y arrastre de sólidos, ocasiona actualmente procesos erosivos en las márgenes del curso, afectando la correcta operación de los sistemas por colmatación de las estructuras de toma y obstrucción en algunos canales. Silvana Cativa (2018).

a.



b.

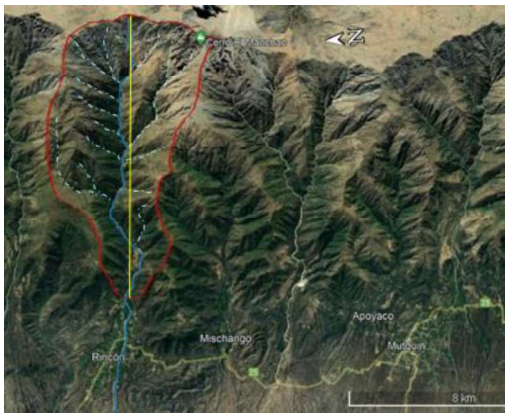


Figura 3. a. Delimitación de la cuenca hídrica del Río Rincón. **b.** Determinación de longitud.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

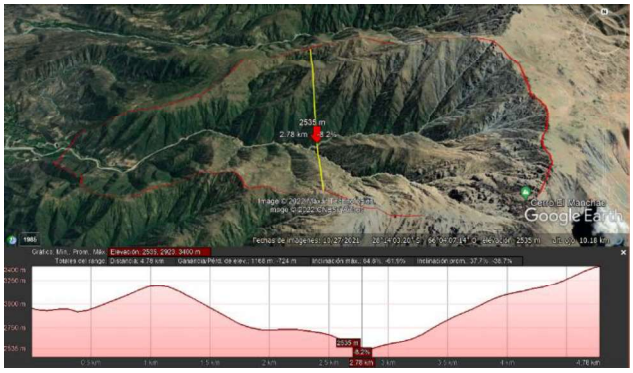


Figura 4. Determinación de desnivel de la cuenca



Figura 5. Curvas de Nivel en Global Mapper y Google Earth

Tabla I Parámetros morfométricos de la cuenca.

PARÁMETRO	DETERMINACIÓN	VALOR
Área (A)	Directa	29.8 km^2
Perímetro (P)	Directa	24.4 km
Longitud (L)	Directa	9 km
Ancho (W)	$W=\frac{A}{L}$	3.31 km
Factor de Forma (Rf)	$Rf=\frac{A}{L^2}$	0.37
Coeficiente de Compacidad (Kc)	$Kc=0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,26
Relación de Elongación (E)	$E=1.124 \times \frac{\sqrt{A}}{Lc}$	0,68
Pendiente de la Cuenca (Sc)	$Sc=\frac{D \times L}{A}=\frac{50\ km \times 11.3\ km}{29.8\ km^2}$	19%

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Análisis geomorfológico del área de estudio

En cuanto a ***la geomorfología del área de estudio***, se analiza la cuenca alta, media y baja del Rincón, como la región es semiárida las corrientes que provienen de la cuenca alta tienen una mayor efectividad erosiva, debido a la existencia de un substrato desprovisto de cubierta vegetal y por la mayor concentración de las lluvias en un periodo estival, dando un patrón de drenaje particular que discurre hasta llegar a la localidad del Rincón para posteriormente desembocar en el Salar de Pipanaco. Se describen:

- **Área Montana:** Esta área está representada por la ladera y vertientes, algunas disecadas y otras con cursos permanentes, la erosión hídrica ha generado valles en forma de V separados por cursos fluviales, en cuanto a su red de drenaje consiste en cursos sub-paralelos, que están influenciados por la pendiente, esta zona engloba lo que es la cuenca alta y media.
- **Área pedemontana:** Es aquella zona que engloba a las unidades geomorfológicas que se encuentran a partir del quiebre de pendiente, esta área está dada por acumulaciones de materiales detríticos que transportan los torrentes del terreno montañoso, tales acumulaciones son debidas a la perdida de pendiente por el terreno. Esta zona está conformada por paleoconos aluviales, por conos aluviales inactivos, por conos aluviales activos.
- **Cauces fluviales y formas a fines:** En la parte baja de la cuenca se encuentra la localidad del Ríncon, se observa que la misma está asentada sobre un gran abanico aluvial y esta zona es la que mayor riesgo presentaría cuando ocurre las grandes crecidas, generalmente estas son ocurridas en los meses de Enero y Febrero, posteriormente el Rio Rincón se intercepta con el Río Saujil para desembocar en el Salar de Pipanaco. En el primer tramo del Rio Rincón es predominantemente recto, al cambio de pendiente se vuelve más sinuoso y anastomosado, generando niveles de terrazas, su caudal es permanente hasta la localidad, luego se transforma en un curso temporaria hasta alcanzar el Salar de Pipanaco.

❖ **Determinación geomorfológica en Google Earth**

Para la determinación geomorfológica en Google Earth se identificó el cauce principal del rio, el lecho menor, mayor y la llanura de inundación. En el análisis se lo realizo detalladamente.

En la Fig. 6.a, se observa la delimitación de la llanura de inundación en color marrón, en ella se apreció como afectaría a la vivienda que se sitúa en el lugar si hubiera una crecida extraordinaria. También se identifica el lecho mayor en color celeste al igual que el lecho menor, mientras que el cauce está determinado con color azul.

Debido al cambio de pendiente el rio se vuelve más sinuoso y anastomosado.

En la Fig. 6.b, se observa la delimitación de la llanura de inundación, lecho mayor, menor y cauce principal, esta zona se encuentra saliendo de la población del Rincón.

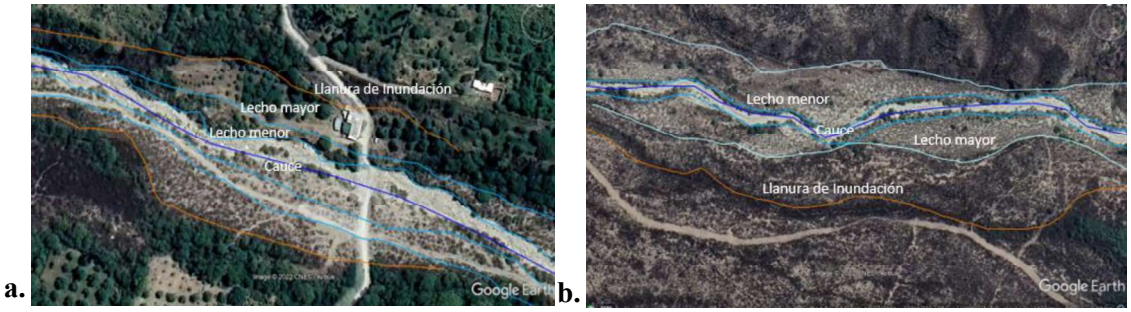


Figura 6. a. b. Determinación geomorfológica

❖ Análisis multitemporal

Se realiza un análisis multitemporal a partir del año 2004 hasta la actualidad para observar los procesos erosivos que han actuado o cambios en la geomorfología del área de estudio. En ella se observa que a lo largo de los años el rio fue socavando sus márgenes, dejando material sedimentario, en lo que hoy en día se presentan con grandes cantidades, también se observa el crecimiento poblacional y el mal ordenamiento territorial, debido que las casas se ubican cada vez más cercanas al curso del río, se observa que algunas se encuentran asentadas en las llanuras de inundación o en las terrazas del río. Así mismo también se ven afectados los cultivos que son propios de la zona. (ver Fig. 7). En el periodo del 2016 se observa en el análisis multitemporal que el caudal del rio es mayor, generando socavación en los bordes del mismo, lo cual es debido al periodo estival del 2014, año en que se originó un alud en la localidad de Sijan.

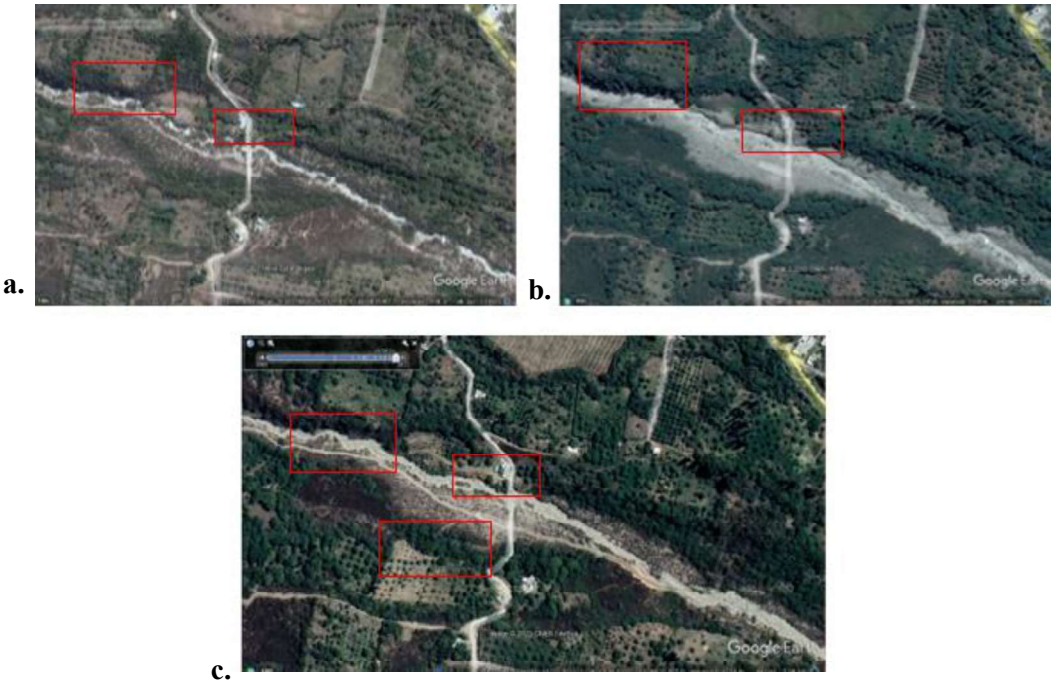


Figura 7. Análisis multitemporal del Rio Rincón. **a.** Año 2004. **b.** Año 2016. **c.** Año 2022.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

❖ Zona de riesgos hídrico

La geoamenaza hídrica corresponde a procesos o fenómenos naturales que pueden causar pérdidas de vida o daños materiales. También puede explicarse en términos de "amenaza o peligrosidad" y definirse como la probabilidad de ocurrencia de un evento hídrico susceptible de generar daños civiles o humanos, dentro de un periodo dado y sobre una determinada área, donde la magnitud de los daños depende la intensidad del fenómeno y esta se relaciona con la "extensión, profundidad del agua, velocidad y duración" del evento.

Se determina que la zona que sufre mayor riesgo es aquella que se encuentra en los laterales del río, en ella se observa algunas casas situadas en las llanuras de inundación y terrazas, también se ven afectados algunas parcelas de cultivos de la zona en el cual son susceptibles a geoamenzas hídricas, debido al que el rio al socavar sus bordes y al avanzar sobre las terrazas donde se sitúan las casas y los cultivos, genera mayor estado de vulnerabilidad ante crecidas extraordinarias. (ver Fig. 8).

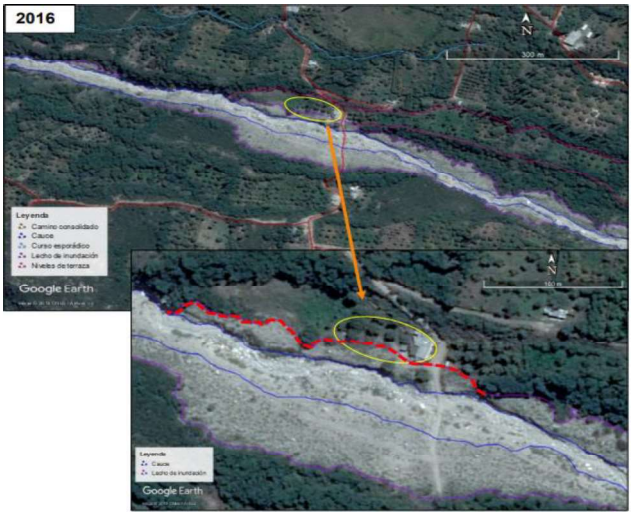


Figura 8. Zona de riesgo hídrico. (Fuente: Silvana Cativa 2018)

CONCLUSIONES

De acuerdo a lo analizado se clasifica a la zona como riesgo medio-alto. Como medida de mitigación se recomienda una planificación de asentamientos urbanos, colocar muros de contención en los márgenes del caudal y realizar limpiezas en el río para permitir el curso de agua libremente.

REFERENCIAS

Alejandro Toselli, Felipe Durand, Juana Rossi de Toselli, Clara Cisterna, Juan Pablo López, Fernando Sardi, Julio Saavedra, Graciela Córdoba y Roberto Miró. *Hoja Geológica 2966 I Aimogasta*. (2018)

Global Mapper, Google Earth

Silvana Cativa *Seminario de Geología e identificación de geoamenazas hídricas entre las localidades de villa de Pomán y Rincón, dpto. Pomán, prov*. De Catamarca. (2018).

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA DESTINADA A CONSUMO HUMANO EN EL BARRIO LA PRADERA DEL PARTIDO DE VILLA GESELL, ARGENTINA

Facundo Barros Cortés[a], Leonardo Sanchez Caro[b], Silvina Carretero[b]

[a] *FCNYM, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*

[b] *CONICET, CEIDE, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*

e-mail: barroscortesf@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue analizar la calidad del agua subterránea destinada a consumo humano en el barrio La Pradera del Partido de Villa Gesell, Provincia de Buenos Aires. Se realizó una campaña de muestreo en julio 2022, donde se determinó in situ la conductividad eléctrica y la concentración de NO_3- y NO_2-, en un total de 26 muestras de agua tomadas de perforaciones domésticas. El barrio no cuenta con servicio de saneamiento cloacal, y en los casos analizados la construcción de pozos ciegos ha sido precaria. Los resultados muestran que el agua presenta concentraciones de NO_3- por encima del límite de 45 mg/L establecido por el Código Alimentario Argentino (CAA) en 10 casas, con concentraciones que oscilan entre los 100 a 500 mg/L. La concentración de NO_2- no supera los 1 mg/L en todos los casos. Por su parte, la conductividad eléctrica varió entre 250 y 1370 µS/cm, lo cual indica una salinidad relativamente baja. Se concluye que el agua de 38% de las viviendas presentan condiciones que no cumplen con la normativa vigente, visibilizando una problemática. Se recomienda promover el desarrollo de obras públicas que mitiguen el impacto de la urbanización sobre el recurso hídrico subterráneo, con el fin de garantizar el acceso al agua potable a largo plazo, en una localidad que actualmente se encuentra en expansión.

Palabras Clave: Potabilidad, Saneamiento, Urbanización.

INTRODUCCIÓN

Los acuíferos son grandes reservorios de agua dulce, ya que permiten la circulación del agua por sus poros o grietas, permitiendo el aprovechamiento en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades (Custodio y Llamas,1983.), para el caso de acuíferos costeros tienen una fuerte conexión hidráulica con el mar. La alta porosidad y conductividad hidráulica favorecen la penetración del agua marina por la base del acuífero. Ghyben (1888) y Herzberg (1901) sitúan a la interfase a una profundidad 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en ese punto. Al encontrarse cercano a la fase de agua salada, una incorrecta o nula planificación de su explotación puede generar una intrusión salina al acuífero, provocando un incremento de sales disueltas, y por tanto afectando la potabilidad del mismo.

Otro de los factores que inciden en la potabilidad del acuífero, es el contenido de aniones de nitratos y nitritos. La presencia de nitratos en el agua puede ser natural o antrópica, y la contaminación de carácter puntual o difusa (por desechos municipales o industriales o cercanía a pozos ciegos). Se presenta de manera puntual por la existencia de una

concentración alta de animales en un lote como por ejemplo en: feedlots, tambos; tanques sépticos, sistemas de disposición de estiércol, o difusa como en el caso de la contaminación de aguas por fertilización de suelos (Candela y Aureli, 1998; Mompo et al., 1992), o por la coalescencia de numerosas fuentes puntuales muy próximas entre sí. En el área urbana, la contaminación del agua subterránea se debe a descargas de desechos municipales e industriales, cercanía a pozos ciegos, o fugas en redes cloacales, etc. Los valores de NO3 - en agua deben ajustarse a la máxima concentración límite: 45 mg/l (Código Alimentario Argentino, 1995).

La construcción de viviendas precarias y la falta de urbanización, aumentan los riesgos de contaminación por filtración de efluentes cloacales hacia los pozos domésticos de agua. La distancia entre pozos, el tipo de material de construcción y la antigüedad, podrían ser factores causantes de la contaminación.

El barrio "La Pradera" (ver Fig 1), se encuentra dentro de la localidad de Villa Gesell, cabecera del Partido homónimo (ver Fig 2). Este Partido está ubicado sobre la Barrera Medanosa Oriental de la Provincia de Buenos Aires, que presenta playas abiertas y de arenas finas a medianas, en una costa rectilínea de ancho variable entre 50 y 200 m. Se han reconocido médanos transversales, parabólicos, barjanoides e incluso médanos en estrella al norte del Partido (Isla, 1997 y 2017). Estas geoformas se caracterizan por presentar principalmente arenas medias en los sectores de médanos y arenas finas en las depresiones intermedanosas. Sedimentológica y mineralogicamente no se han detectado cambios relevantes a lo largo de este municipio costero, aunque sí variaciones texturales en sentido transversal (playa distal, frontal y duna costera), con un mayor diámetro de arenas hacia los ambientes continentales, y un aumento de la selección hacia la playa frontal (Bértola, 2006).

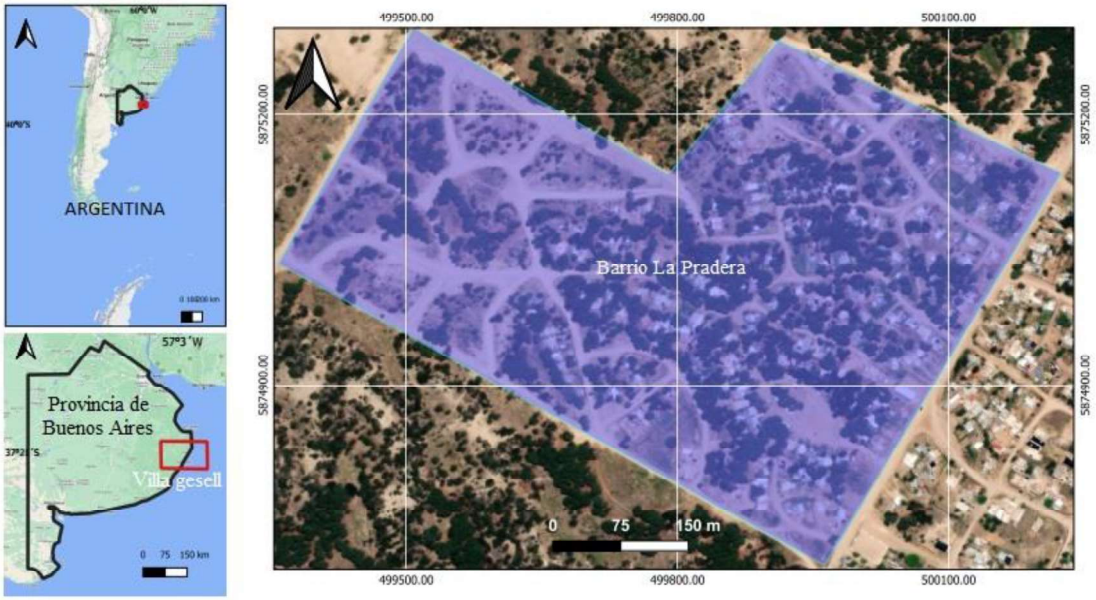


Figura 1. Barrio La Pradera,Villa Gesell.

La localidad de Villa Gesell ha presentado un crecimiento urbano lineal muy acelerado principalmente en los primeros 300 m de la línea de costa sobre terrenos ocupados por médanos, alcanzando entre los años 1974 y 1975 los índices de crecimiento urbano más

altos del país (Juárez e Isla, 1999). Este proceso de urbanización se llevó adelante sin la correspondiente planificación y desarrollo de políticas de manejo costero, lo cual derivó en modelos de gestión ambiental deficientes (Dadon, 2011). La expansión gradual de las actividades turísticas y la urbanización desde los entornos urbanos hacia las playas más alejadas y conservadas, e incluso hacia las zonas de reserva, dio como resultado un gradiente de impacto antrópico (Dadon, 2002).

El origen del barrio La Pradera comienza a mediados del 2007, donde alrededor de 5 familias construyeron su vivienda en las tierras de Luis García Balcarce, apoderado de las mismas. Posteriormente, un número más amplio de familias en situación de emergencia habitacional sumaron sus viviendas al barrio, sin previa planificación y de forma precaria.

En la actualidad el barrio cuenta con la instalación de la primera red de agua corriente, aunque no garantizada para todas las familias por el momento, y no existen obras de red cloacal. Desde la aprobación del proyecto en el Honorable Consejo Deliberante, el cual también fue aprobado por Provincia y Nación dentro de las secretarías de Planeamiento Provincial, Tierra y Hábitat Nación (enmarcada en la ley 14449, que garantiza el acceso a la vivienda digna), La Pradera se encuentra en proceso de urbanización.

En el presente trabajo se analizó la calidad de agua subterránea destinada a consumo humano en el barrio La Pradera, de la localidad de Villa Gesell. Para visualizar áreas de mayor grado de contaminación de la fuente, y generar información para promover el desarrollo de obras públicas que mitiguen el impacto de la urbanización sobre el recurso hídrico, con la finalidad de garantizar el acceso al agua potable a largo plazo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de campo se realizó durante julio de 2022. Se obtuvieron 26 muestras, las cuales fueron adquiridas directamente de perforaciones “domésticas” preexistentes (ver Fig 3). “Previo a la adquisición de la muestra,” se purgo cada fuente de agua aproximadamente por un lapso de 1 min.

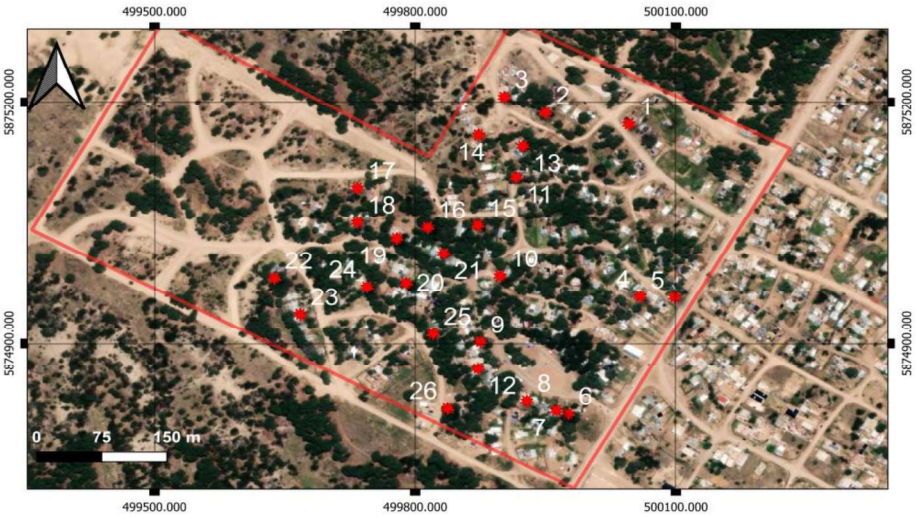


Figura 3. Ubicación de perforaciones de agua

Se determinó in situ la concentración iónica total de la solución, utilizando un conductímetro PCE-CM 41.

Se realizaron ensayos semi-cuantitativos a través de tiras reactivas Quantofix®, para determinar in situ la concentración (mg/L) de aniones NO_3- y NO_2-. La realización de los ensayos fue efectuado por los vecinos y vecinas (ver Fig 4).



Figura 4. Vecinos realizando los ensayos

Durante el trabajo de campo se invitó a participar a la comunidad, aplicando la metodología de mapeo colectivo. La cual es una práctica, una reflexión grupal que facilita

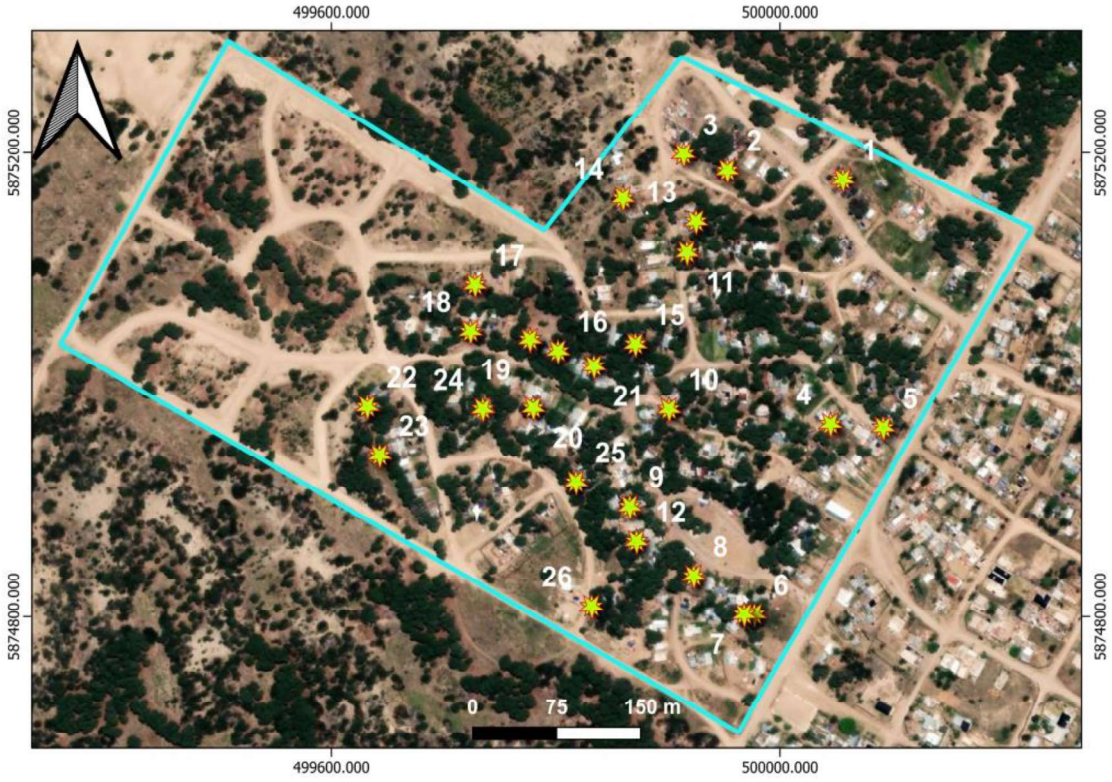


Figura 5. Ubicación de pozos ciegos

el abordaje y la problematización de territorios sociales, subjetivos y geográficos. Permite cruzar conocimientos de distintas asignaturas y puntualizar saberes que nos permitan comprender y señalar diversos aspectos de la realidad. (Iconoclasistas. Mapeando el territorio. https://iconoclasistas.net/).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Con la finalidad de evaluar el estado actual de los pozos ciegos se realizó un cuestionario, en el cual se especificó la ubicación (ver Fig 5), antigüedad, profundidad, y material de construcción (ver Tabla I).

Tabla I. Resultados del censo de perforaciones domésticas.

Muestra	Antigüedad (años)	Distancia e/ P.A Y P.C (m)	Nitritos (mg/L)	Nitratos (mg/L)	material de pozo	Conductividad (µS/cm)
1	2	12,3	1	10	tanque	260
2	5	3,16	1	10	tanque	284
3	5	13,3	1	400	tanque	no se hizo
4	1	15	1	10	tanque	264
5	1	8,06	1	20	tanque	360
6	2	11,24	1	20	tanque	500
7	9	15,98	1	40	ladrillo	447
8	1	8,2	1	400	ladrillo	1370
9	6	11,05	1	400	ladrillo	1005
10	2	5,82	1	10	anillo cem	571
11	2	8,05	1	40	lata	452
12	5	3,15	1	400	anillo cem	965
13	2	4,85	1	10	ladrillo	509
14	2	11,73	1	200	tanque	450
15	5	11,57	1	10	ladrillo	265
16	5	19,36	1	0	ladrillo	430
17	3	8,96	1	200	tanque	500
18	11	10,29	1	400	ladrillo	960
19	6	8,51	1	100	lavaropa	650
20	5	10,15	1	200	anillo cem	843
21	5	4,72	1	10	ladrillo	250
22	8	5,62	1	40	cemento	280
23	7	24,37	1	20	tanque	260
24	1	12,4	1	5	tanque	450
25	2	4,97	5	200	tanque	884
26	5	3,65	1	10	tanque	369

Se realizaron 9 sondeos manuales con vizcachera (ver Fig 6), distribuidos en toda la extensión del barrio La Pradera (ver Fig 7), mediante los cuales se obtuvo la profundidad del nivel freático.

 ISBN: 978-987-1323-89-0



Figura 6. Realización de perforaciones con vizcachera



Figura 7. Ubicación pozos de sondeo

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Posteriormente se confeccionaron mapas de isovariación a partir de la utilización del software Qgis Desktop 3.22.16, aplicando el método IDW de interpolación. Los mismos corresponden a Nitratos, Nitritos, y conductividad.

A través de gráficos de dispersión se trató de establecer correlación entre la concentración de nitratos y la antigüedad de los pozos ciegos, o la distancia entre pozos ciegos y captaciones de agua.

RESULTADOS

Evaluadas todas las muestras en conjunto (Tabla I), se encontró que el valor máximo observado de Nitratos fue de 400 mg/L y el mínimo de 5 mg/L.

El 38,5% de las muestras se encuentran por encima de 45 mg/L, límite establecido por el CAA.

La concentración de Nitritos máxima es de 5 mg/l y la mínima de 1 mg/L. Una muestra posee un valor de 5 mg/L, mientras que el resto presenta 1 mg/L. Según el CAA, ninguna muestra se encuentra por encima del límite establecido.

En cuanto a la conductividad, los valores indican una salinidad relativamente baja, con valores entre 260 y 1370 µS/cm.

Se interpretó a partir de mapas de isovariación correspondientes a nitratos (ver Fig 8), nitritos (ver Fig 9.), y conductividad (ver Fig 10). Dos áreas del sector norte y una única área del sureste, las cuales poseen máximas concentraciones de nitratos, que oscilan de 200 a 400 mg/L. El Código Alimentario Argentino, establece el límite de 45 mg/L apto para consumo humano.

Respecto de los nitritos, se observa una homogeneidad de valores en el total del área de estudio, a excepción de un único punto (25) que presenta un valor de 5 mg/L.

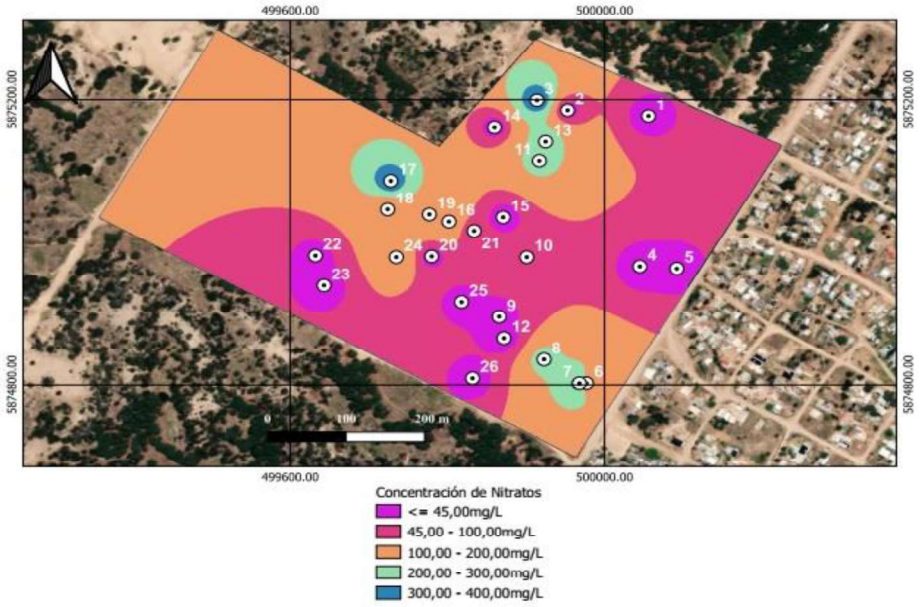


Figura 8. Mapa de Isoconcentración de nitratos

 ISBN: 978-987-1323-89-0

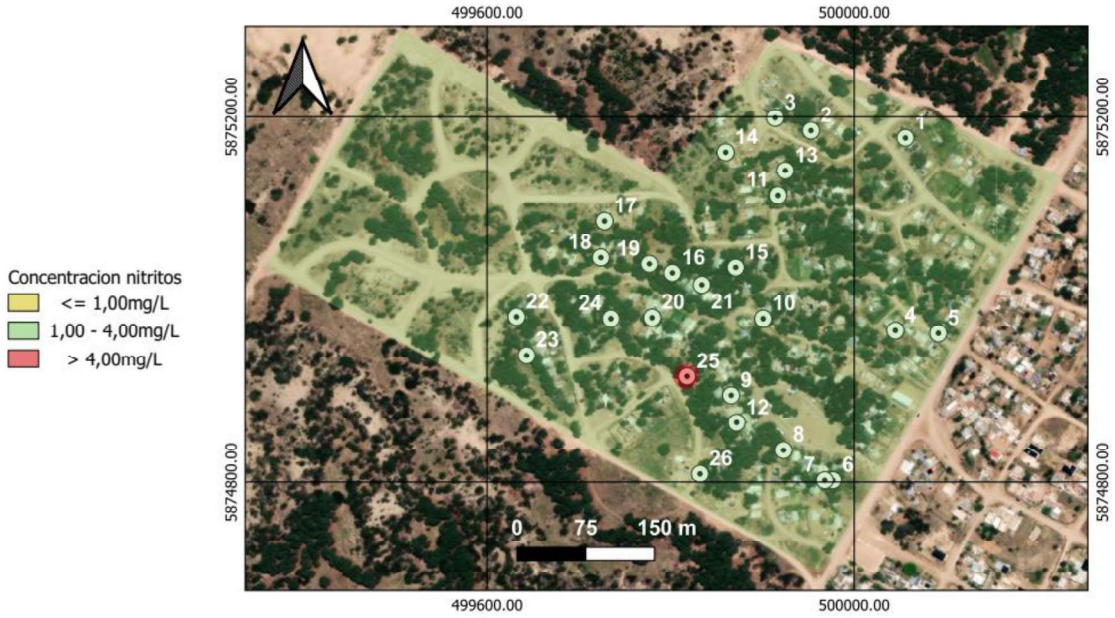


Figura 9. Mapa de Isoconcentración de nitritos

El análisis del mapa de conductividad, permite caracterizar dos sectores con concentraciones elevadas con mediciones de 850 a 1370 µS/cm. Un sector cercano al pozo18 coincide con altas concentraciones de nitratos. Sin embargo, el sector inferior

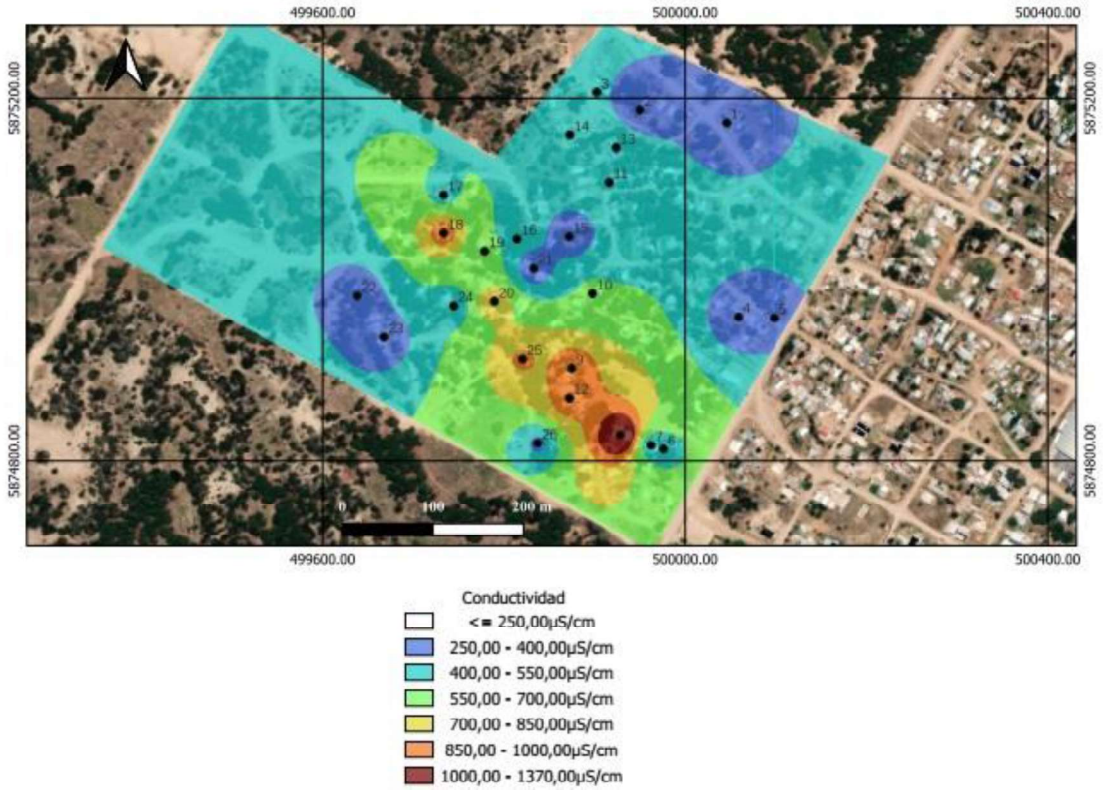


Figura 10. Mapa de conductividad

cercano a los pozos 25,9,12 y 8 (sureste), no están vinculados con altas concentraciones de nitrato.

No pudo identificarse una correlación entre la concentración de nitratos y la antigüedad de los pozos ciegos, o la distancia entre pozos ciegos y captaciones de agua (ver Fig 11)

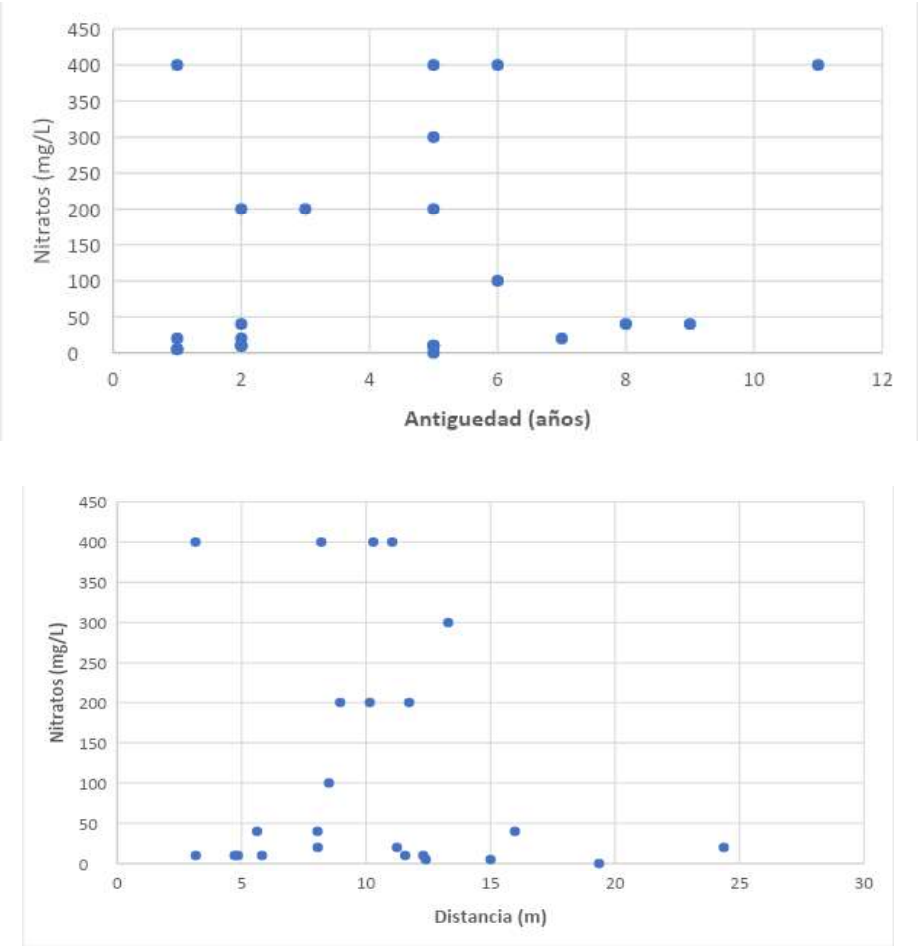


Figura 11. a. Relación entre antigüedad del pozo ciego y concentración de nitratos. **b.** Relación entre concentración Nitratos y distancia entre pozos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el 38% de las viviendas presentan condiciones que no cumplen con la normativa vigente aceptada. Se hallaron valores mínimos de 5 mg/L y máximos de 400 mg/L(Nitratos), 1 mg/L y 5 mg/L (Nitritos), 260 y 1370 µS/cm (Conductividad). La confección de mapas de concentración permitiría determinar zonas potenciales de riesgo. Considerando la concentración de nitratos, se identificaron dos zonas en el sector norte, aquella cercana a los pozos de agua 18 y 17, y la otra cercana a pozos 3,11 y 13. Al sur existe un área cercana a los pozos 6,7 y 8.

Teniendo en cuenta la conductividad, se identifica en el sector norte un área próxima al pozo de agua 18, y hacia el sur el área comprendida entre los pozos 8,9 y 12.

Las altas concentraciones de nitrato no mostraron correlación con la antigüedad de los pozos ciegos o la distancia entre estos pozos y la captación de agua en cada vivienda. Se

plantea que las concentraciones más altas de conductividad y nitratos podrían tratarse de fenómenos zonales, donde el flujo subterráneo en el acuífero freático sería el principal condicionante de la generación de zonas críticas debido a la contaminación por nitratos. Para evaluar más profundamente los factores intervinientes en la contaminación del acuífero freático en el barrio La Pradera, estudios futuros deberán centrarse en la obtención de un mapa de flujo a escala local y regional.

Es de consideración advertir a la población del estado del agua subterránea, teniendo en cuenta que muchas familias aún consumen agua proveniente del acuífero freático.

Se recomendará al área de salud municipal una campaña de información para la población sobre el uso de métodos de potabilización adecuados para el agua de consumo proveniente de fuentes subterráneas.

Se recomienda promover el desarrollo de obras públicas que mitiguen el impacto de la urbanización sobre el recurso hídrico subterráneo, con el fin de garantizar el acceso al agua potable a largo plazo, en una localidad que actualmente se encuentra en expansión.

REFERENCIAS

Bertola, G. R. (2006). Morfodinámica de playas del sudeste de la provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). Latin American journal of sedimentology and basin analysis, 13(1), 31-57.

Candela L, Aureli A. 1998. Agricultural threats to groundwater quality. IHP-UNESCO, IAMZ-CIHEAM, 251 pp.

Código Alimentario Argentino, 1995. Calidad de aguas de bebida, Cap.XII. E- 243, DNPH. 5pp. http://www.anmat.gov.ar/alimentos/codigoa/CAPITULO_XII.pdf

Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). Hidrología Subterránea. Barcelona: Omega (2a. ed.).

Custodio, E.1987. Prediction methods. Chapter 8. In Studies and Reports in Hydrology: Groundwater Problems in Coastal Areas, ed. G.A. Bruggeman and E. Custodio. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris, 595 pp.

Dadon, J. R., (2002). El impacto del turismo sobre los recursos naturales costeros en la costa pampeana. En: Dadon, J.R y Mateucci, S.D. (Eds.). Zona Costera de la Pampa Argentina. Lugar Editorial, Buenos Aires, 101-121

Dadon, J.R. (2011). La gestión ambiental de las urbanizaciones turísticas costeras. En: Dadon, J.R. (Ed.). Ciudad, paisaje y turismo: frentes urbanos costeros. Buenos Aires: Ed. Nobuko, 313-329.

Isla, F. I. (1997). Seasonal behaviour of Mar Chiquita tidal inlet in relation to adjacent beaches, Argentina. Journal of Coastal Research, 1221-1232.

Isla, F. I. (2017). Coastal barriers from Argentina: Buenos Aires, Patagonia and Tierra del Fuego. Quaternary and Environmental Geosciences, 8(1), 1-9.

Iconoclasistas. Mapeando el territorio. https://iconoclasistas.net/

Juárez, V., e Isla, F. (1999). Evolución histórica del núcleo urbano de Villa Gesell. Revista Geográfica, 49- 60.

Ley 14.449 Boletín Oficial, La Plata, 29 de noviembre de 2012.

RELACIONES ENTRE DINÁMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA CON LA DISTRIBUCIÓN Y MORFOLOGÍA DE CUERPOS MEDANOSOS

Fátima Bécher Quinodóz[ab], Mónica Blarasin[a], Susana Degiovanni[a], Adriana Cabrera[a], y Juan Felizzia[a]

[a]*Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto, ARGENTINA.*
[b]*Consejo Nacional de Investigación Científica y Técnica (CONICET)*

e-mail: fbecher@exa.unrc.edu.ar

RESUMEN

El área constituye un palimpsesto resultante de la yuxtaposición del sistema eólico ("Mar de Arena Pampeano") con el sistema fluvial río Quinto, presentando dunas longitudinales, con parabólicas y barjanoides sobreimpuestas derivadas de reactivaciones modernas, que se suman a paleocanales y antiguos derrames del río Quinto. El objetivo de este trabajo es establecer la influencia que los médanos presentan sobre la dinámica y calidad del agua subterránea y a su vez el posible control de la profundidad del nivel freático sobre la morfología y distribución espacial de cuerpos dunarios. Se observó que la profundidad del nivel freático resultó en uno de los condicionantes para la cantidad y dimensiones de cuerpos medanosos hallados en los distintos ambientes geomorfológicos. Además, se encontró que existe una clara asociación entre el relieve y la dinámica del agua, observándose que en las dunas parabólicas activas hay una importante recarga al acuífero libre procedentes de lluvias actuales, del orden del 8 al 9,5 %, medida con el método del ion cloruro y fluctuación de nivel freático, respectivamente. Finalmente, respecto a la calidad del agua subterránea se encontró una relación relevante con las características litológicas y la geomorfología, el análisis estadístico en Modo Q presentó dos grupos: G_1, que asocia aguas salobres y saladas, sulfatadas y cloruradas, con las unidades geomorfológicas sin cuerpos dunarios activos (depresión de Tigre Muerto, antiguos bañados de la Amarga y planicie arenosa) donde el agua es más evolucionada resultantes de un largo tránsito de flujos subterráneos regionales. Mientras que G2, vincula aguas dulces y bicarbonatadas con médanos activos, lomas topográficas, la faja fluvial, los paleoderrames y paleocanales del río Quinto, es decir sectores donde se desarrollan sistemas de flujos locales del agua subterránea (recarga reciente de lluvias).

Palabras Clave: Aguas subterráneas, Geomorfología, Dinámica y Calidad, Análisis Estadístico

INTRODUCCIÓN

En el estudio de las aguas subterráneas, es fundamental conocer los modelos de circulación que presentan en diferentes circuitos y profundidades y su relación con la topografía, con los materiales por los que circula y con los cuerpos de agua superficial. Según Toth (1999), los sistemas de agua subterránea muestran jerarquización de los flujos de agua distinguiéndose niveles locales, intermedios y regionales. Producto de la interacción agua-sedimento y del tiempo de tránsito del flujo subterráneo, se producen cambios en las facies aniónicas del agua, de bicarbonatadas hasta cloruradas pasando por sulfatadas, según las direcciones de flujo y/o la profundidad. En el caso del Sur de Córdoba, el recurso hídrico más utilizado para todas las actividades, es el agua subterránea del acuífero libre de la llanura, con zona preferencial de recarga en el pedemonte de la Sierra de Comechingones. Posee una salinidad creciente que evoluciona geoquímicamente en sentido del flujo, desde aguas dulces (bicarbonatadas cálcicas y

sódicas) en las áreas de recarga, hasta saladas (cloruradas sódicas) en planicies distales y ambientes deprimidos (Blarasin et al., 2014). La aptitud del agua para uso humano, ganadero y riego, excelente en sectores serranos y ámbito de las fajas fluviales de los principales ríos, disminuye notoriamente en el sentido del flujo, por lo que las áreas menos propicias para la explotación son las contenidas en la periferia de la provincia, donde abundan sedimentos eólicos y aumentan además los tenores de arsénico, flúor y otros elementos traza. Sin embargo, en estas áreas existen condicionamientos geomorfológicos–litológicos locales que permiten hallar aguas aptas originadas por recarga local a partir de lluvias en lomas y dunas (Blarasin et al., 2014). En función de los antecedentes regionales mencionados (Blarasin et al., 2014), resulta necesario conocer los condicionamientos geomorfológicos sobre la calidad del agua, por lo cual se ha seleccionado un sector de la planicie arenosa del Sur de Cordoba, de 7000 km^2 de superficie, enmarcada por las cordenadas paralelas 33º 50´y 34º 31´ de latitud Sur y meridianas 64º 00´ y 65º 00´ de longitud Oeste. La zona presenta una historia alternada de ciclos dominados por deflación y fundamentalmente agradación eólica con construcción de dunas, y otros de disipación de estas geoformas, actividad fluvial, existencia de lagunas y bañados y pedogénesis dominante. En este sector el agua subterránea del acuífero libre es la más utilizada para todas las actividades, aunque en ocasiones, presenta una composición química natural no apta para diversos usos dados los elevados valores de salinidad, sulfatos, arsénico y fluoruro (Blarasin et al., 2014). En este marco, se plantea como objetivo establecer la influencia que los médanos o dunas presentan sobre la dinámica y calidad del agua subterránea y a su vez el posible control de la profundidad del nivel freático sobre la morfología y distribución espacial de los cuerpos dunarios.

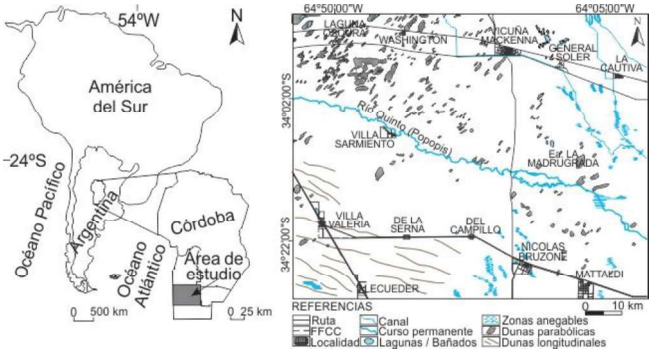


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron antecedentes del área y tema a investigar, disponiéndose de hojas topográficas (1:50.000) del Instituto Geográfico Nacional. Se contó con información perteneciente a la estación El Colorado - El Olvido con una serie temporal de 111 años (1903 – 2014). Se efectuó el estudio geológico - geomorfológico, a través de la descripción de perfiles litológicos aflorantes y procedentes de perforaciones. En el estudio hidrogeológico la red censada quedó conformada por 90 pozos de 50 m de profundidad máxima, que captan de los primeros 20 metros del acuífero libre, lo que define el alcance del estudio realizado. Para el análisis hidrodinámico del acuífero libre se elaboraron e interpretaron el mapa de equipotenciales hidráulicos y el de profundidad del nivel freático. Con ambos mapas y la base topográfica se analizaron las relaciones existentes entre las geoformas eólicas y el agua subterránea del acuífero libre. Se dispuso además de información antecedente de un freatígrafo, ubicado en la zona medanosa de Laguna

Oscura, contándose con datos de variación de nivel freático y de recarga efectiva al acuífero libre y su relación con el ambiente de dunas (Bécher Quinodóz, 2016). Para el análisis hidroquímico, se midieron in situ temperatura y pH con medidor Hanna HI 98127 y conductividad eléctrica (CE) con conductímetro Hanna HI 9033. Finalmente, las muestras fueron correctamente acondicionadas, envasadas en botellas de plástico de alta densidad, refrigeradas a 4ºC) y transportadas al laboratorio para su correspondiente análisis. Los análisis físico-químicos de las muestras, siguiendo Standard Methods (APHA-AWWA-WEF, 2017), fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología (UNRC). La información resultante de los antecedentes hidrogeológicos y los obtenidos en la caracterización hidrogeoquímica, permitió elaborar el modelo hidrogeológico conceptual. Para validar dicho modelo y establecer las posibles relaciones entre la presencia y distribución de los cuerpos medanosos con la dinámica del agua, profundidad del nivel freático y calidad de agua del acuífero libre, se realizaron análisis estadísticos descriptivos uni y multivariados utilizando el software SPSS (V21). El análisis estadístico multivariado se realizó mediante el tratamiento de agrupamiento cluster entre observaciones (modo Q), para lo cual los datos fueron estandarizados (debido a que las unidades de medida de las variables consideradas son diferentes).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima en la zona es de tipo mesotermal subhúmedo-seco, con una precipitación media anual de 750 mm (ver Fig. 2a), concentrada principalmente en primavera-verano. La serie de precipitaciones anuales (P) exhibe un mínimo de 119 mm y un máximo de 1.331 mm.

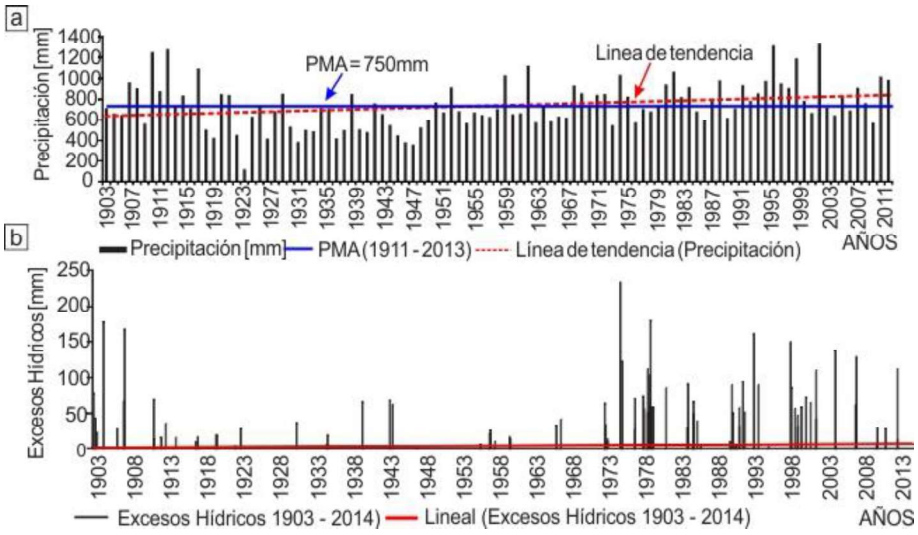


Figura 2. a. Curva cronológica anual de precipitaciones. **b.** Curva de distribución de excesos hídricos.

El balance hídrico edáfico seriado, de paso mensual, muestra que entre 58,5 y 100% de P es devuelto a la atmósfera como evapotranspiración real. Los déficits de agua se producen fundamentalmente en los meses de otoño-invierno y los excesos hídricos mensuales, que aportan al escurrimiento superficial y/o a la recarga efectiva del acuífero libre, resultaron variables entre 0 y 204 mm, alojándose principalmente en primavera-verano, muy condicionados por el comportamiento de las precipitaciones. La tendencia de los excesos hídricos es creciente, fundamentalmente a partir de 1972, destacándose el período 1998-2004, por presentar los excesos más importantes de la serie (1.673 mm de excesos y 277

mm de déficit). A partir de 2004 y hasta 2014, los déficits hídricos se incrementaron (1.130 mm de déficit y 501 mm de excesos), ver Fig. 2b.

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA-LITOLÓGICA

La zona se localiza en la provincia geológica Llanura Chaco Pampeana, al Este y Sudeste de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En el extremo sudoriental de esta última, el río Quinto, que atraviesa la zona de estudio, desarrolla su área de nacientes. El área, de carácter dominantemente agradacional, presenta un relieve plano a suavemente ondulado y control estructural asociado a la tectónica de bloques de la región, cuya conformación actual se relaciona a la orogenia ándica. En el área no aflora basamento cristalino ni fue interceptado por las perforaciones censadas. Desde el punto de vista geomorfológico, sólo existen relieves agradacionales del Pleistoceno superior - Holoceno, resultantes de la interacción e interdigitación del Mar de Arena Pampeano (Iriondo, 1999) con el sistema fluvial del río Quinto, el cual ha desarrollado un paleoabanico aluvial con ápices en diferentes posiciones. El paisaje constituye un verdadero palimpsesto, reconociéndose tres grandes unidades geomorfológicas: I- Llanura Eólica, II- Llanura Fluvio-Eólica imperfectamente drenada y III- Llanura Fluvial del río Quinto, en las que se han identificado subunidades para cada una de ellas (ver Fig. 3). Entre éstas se destaca la unidad de campos de dunas, con pendientes de hasta 2%, en el que viejas dunas longitudinales (Pleistoceno tardío-Holoceno, Tripaldi y Forman, 2007; Latrubesse y Ramonell, 2010) fueron disipadas y retrabajadas por vientos del NE, fundamentalmente en la Pequeña Edad de Hielo, generándose un paisaje de dunas parabólicas de muy diversas dimensiones. Se reconocen formas simples, aunque son más comunes las dunas compuestas y complejas (Pye, 1993), rodeadas, en general de mantos de arena removilizados. Las formas de mayores dimensiones alcanzan hasta 5 km de longitud de eje mayor, las intermedias entre 1 y 1, 5 km y las más pequeñas 0,2-0,5 km; los desniveles locales son del orden de 5-8 m, en las más conspicuas. En la mayoría de las dunas las cubetas de deflación están ocupadas por lagunas y bañados, por lo general permanentes, de profundidad moderada y bordes muy vegetados. Se reconocen a su vez dunas parabólicas activas, donde la removilización local de arenas, producida por vientos secundarios del NE, ha formado cadenas barjanoides y cubetas de deflación, controladas en su mayoría por técnicas de manejo (plantación de álamos). En todas las unidades dominan sedimentos psamo - pelíticos con variable grado de cementación carbonática, reconociéndose en el ambiente fluvial, arenas muy gruesas y localmente gravas, en el ambiente fluvio-eólico aparecen subordinadamente arenas gruesas a muy gruesas, mientras que en el ambiente eólico se destaca la fracción arenas muy finas – limosas con un aumento del porcentaje limo-arcilla en las áreas deprimidas (bajos hidrohalomórficos). En los ambientes medanosos, la fracción dominante es la de las arenas muy finas en el orden del 65% con un porcentaje elevado de arenas finas (25%), mientras que la fracción limo – arcilla no supera el 9%. En el sector de bajos topográficos y bañados, se observa un alto porcentaje de la fracción limo – arcilla (34%) aunque la fracción arenas muy finas continúa siendo la dominante (45% a un 55%).

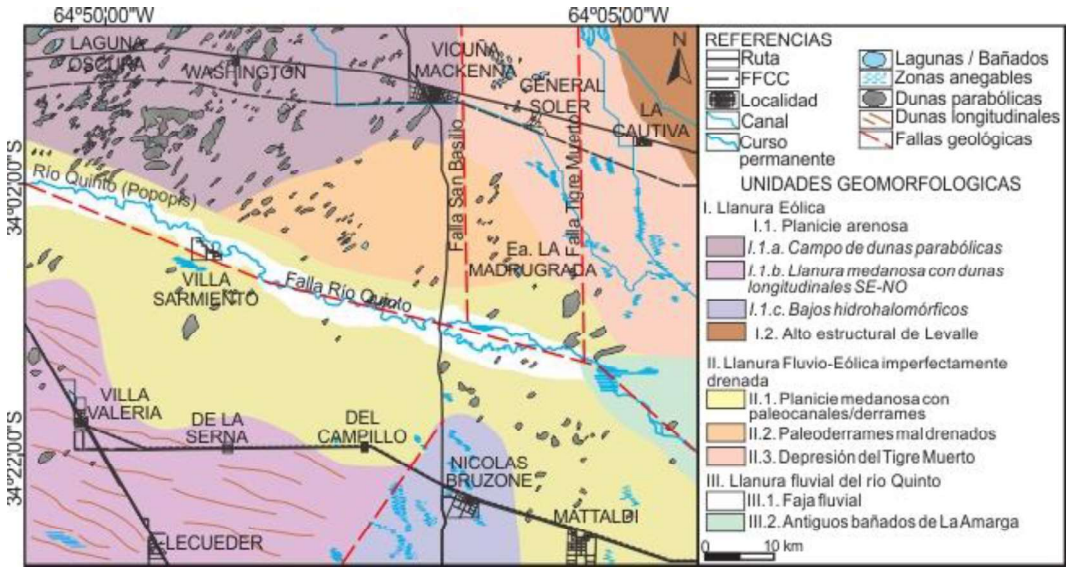


Figura 3. Mapa geomorfológico.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDRODINÁMICA

El acuífero estudiado es el libre, con un espesor aproximado de 80-100 m, el cual exhibe moderada homogeneidad dado el dominio de sedimentos finos, aunque se reconocen cambios faciales que a una escala local implican anisotropías desde el punto de vista hidráulico (ver Fig. 4a y 4c). Estos cambios están vinculados a materiales más cementados o bien a los sectores medanosos que tienen proporciones de 10 % hasta 37,2 % de arenas finas, o más gruesos (17,1 % y 30,3 % de arenas gruesas y medias respectivamente) asociados al ámbito de la faja fluvial del río Quinto y áreas de derrame. Los materiales dominantes en toda la zona (arenas muy finas), presentan valores de conductividad hidráulica (K) del orden de 1-2 m/día. En los ensayos de bombeo realizados en zonas medanosas (Blarasin et al., 2013), estos valores alcanzan hasta 5-7 m/d en sedimentos arenosos finos y medios. Los sectores con mejores propiedades acuíferas están vinculados a la faja fluvial antigua y actual del río Quinto y a los sistemas de médanos removilizados de la unidad planicie arenosa. Esto se debe al predominio de materiales arenosos finos, medios, gruesos y con gravillas dispersas, en donde los valores de K, muy localmente, pueden alcanzar los 5-10 m/día, lo que le otorga cierta heterogeneidad y anisotropía al acuífero (Bécher Quinodóz, 2014). Los sedimentos en el sector oriental más deprimido, limo-arcillosos o cementados, pueden presentar valores de K inferiores, del orden de 0,001-0,5 m/d y porosidades efectivas muy bajas (< 2 %), lo que les confiere características acuitardas y acuícludas (Bécher Quinodóz, 2014). La dirección de escurrimiento general del agua es NO-SE, paralela a la traza del río Quinto (ver Fig. 4b). La superficie freática presenta morfología desde suavemente ondulada en el sector SE a casi planar en el sector centro. La traza de las líneas de flujos indica que en su mayor parte el sector se comporta como un área de tránsito del flujo subterráneo procedente del sector occidental, mientras que en el extremo sur los bajos topográficos actúan como zonas de descarga (pantanos) del acuífero libre (ver Fig. 4b). Los gradientes hidráulicos calculados son muy bajos del orden de 0,1% asociado con áreas más planas y bajos hidrohalomórficos y de 0,2% vinculado a los sistemas medanoso del sector SO. Las velocidades de escurrimiento del agua subterránea son de 0,04-0,07 m/d (en ambiente más plano, sector centro) y 0,25-0,5 m/d (en arenas de los campos de dunas del sector E-NE). La profundidad del nivel freático es variable, desde aflorar en superficie hasta una profundidad de 10,5 m, fundamentalmente como resultado de las características

topográficas del terreno. Así, los mayores valores se encuentran en el alto estructural de Levalle, siguiéndole en importancia, por la extensión que ocupa y por tratarse de valores de 5 a 10 m de profundidad las zonas de campos dunarios (planicie arenosa). Los menores valores de profundidad del nivel freático aparecen en las áreas deprimidas (ver Fig. 4b).

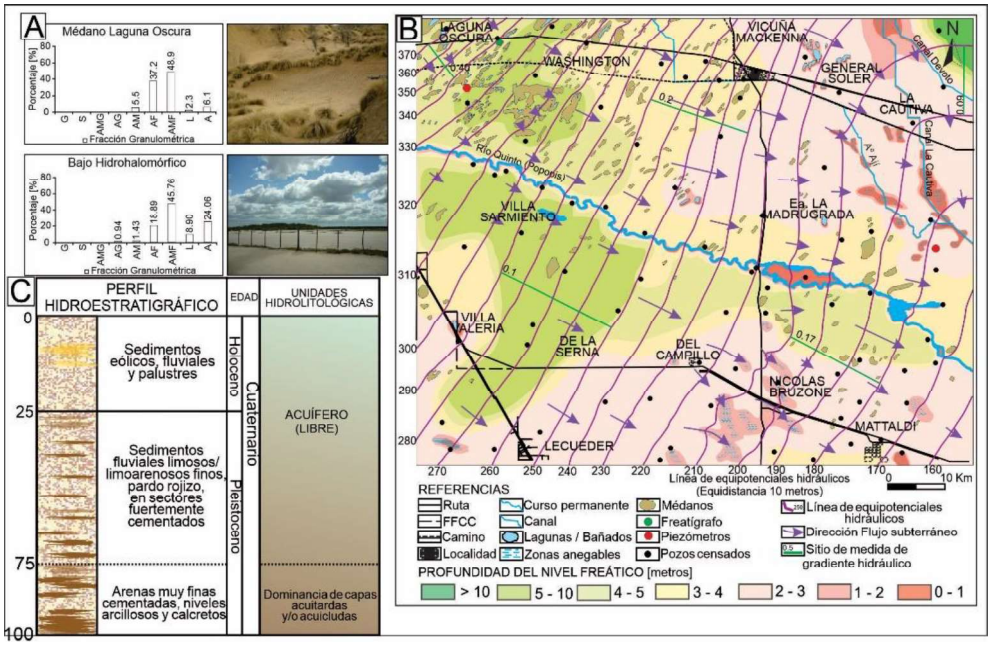


Figura 4. a. Análisis granulométricos en dos ambientes geomorfológicos. **b.** Perfil hidroestratigráfico general. **c.** Mapa de equipotenciales del acuífero libre e isoprofundidad del nivel freático.

Las fluctuaciones del nivel freático en la región en los últimos años de la serie analizada fueron del orden de 1 metro como máximo y están vinculadas fundamentalmente a la infiltración o recarga efectiva que llega al acuífero a partir de las precipitaciones. El freatigrama en zonas medanosas muestra una recarga de tipo episódica, es decir picos de ascenso del nivel freático inmediatamente de ocurridas las lluvias y luego descensos inmediatos por descarga a las lagunas de las cubetas medanosas. La recarga anual al acuífero fue estimada por diferentes métodos en un valor del orden del 10 % de la precipitación total anual (Bécher Quinodóz et al., 2016).

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

El estudio estadístico univariado de las 90 muestras, determinó que la salinidad (SDT) presenta una media de 3.093 mg/L, con mínimo de 455 mg/L y máximo de 10.171 mg/L y un desvío de 2.407,72 (Tabla I), lo que indica una gran variabilidad de este parámetro. Las aguas con salinidades desde 455 mg/L (dulces/bicarbonatadas sódicas), se vinculan a médanos activos en el sector NO, centro y SE (considerados sectores preferenciales de recarga directa a partir del agua de lluvia), hasta aproximadamente 1.500 mg/L en lomas topográficas (asociados a paleoderrames al Sur del río Quinto, paleocauces al Sur de Villa Sarmiento y a antiguas dunas longitudinales). En la mayor parte de la llanura eólica el agua alcanza valores de salinidad de 2.000 hasta 11.000 mg/L (saladas/sulfatadas a cloruradas sódicas), los mayores corresponden a las zonas de bajos topográficos (depresión de Tigre Muerto y sector SO y S), lugares donde el nivel freático está próximo a la superficie o aflorando. Allí llegan aguas que han transitado importantes trayectos y además las velocidades de circulación son muy lentas, lo que posibilita un mayor tiempo

 ISBN: 978-987-1323-89-0

de contacto del agua con los sedimentos, aumentando la posibilidad de incorporar solutos (ver Fig. 5).

Tabla I. Estadísticos descriptivos de las 90 muestras de agua subterránea del acuífero libre.

Parámetros	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
ph	90	1,64	7,34	8,98	8,19	0,34
CE	90	13.880,00	650,00	14.530,00	4.418,55	3.439,62
SDT	90	9.716,00	455,00	10.171,00	3.093,00	2.407,72
CO_3^{-2}	90	72,70	0,00	72,70	6,86	13,54
HCO_3^-	90	1.407,50	287,50	1.695,00	819,88	299,87
SO_4^{-2}	90	2.559,90	15,70	2.575,60	689,99	688,72
Cl^-	90	3.757,10	14,30	3.771,40	727,80	913,83
Na^+	90	4.495,50	54,60	4.550,10	1.135,23	1.020,88
K^+	90	119,10	4,00	123,10	27,70	22,60
Ca^{+2}	90	220,00	2,40	222,40	39,41	36,17
Mg^{+2}	90	201,00	3,90	204,90	48,80	42,89

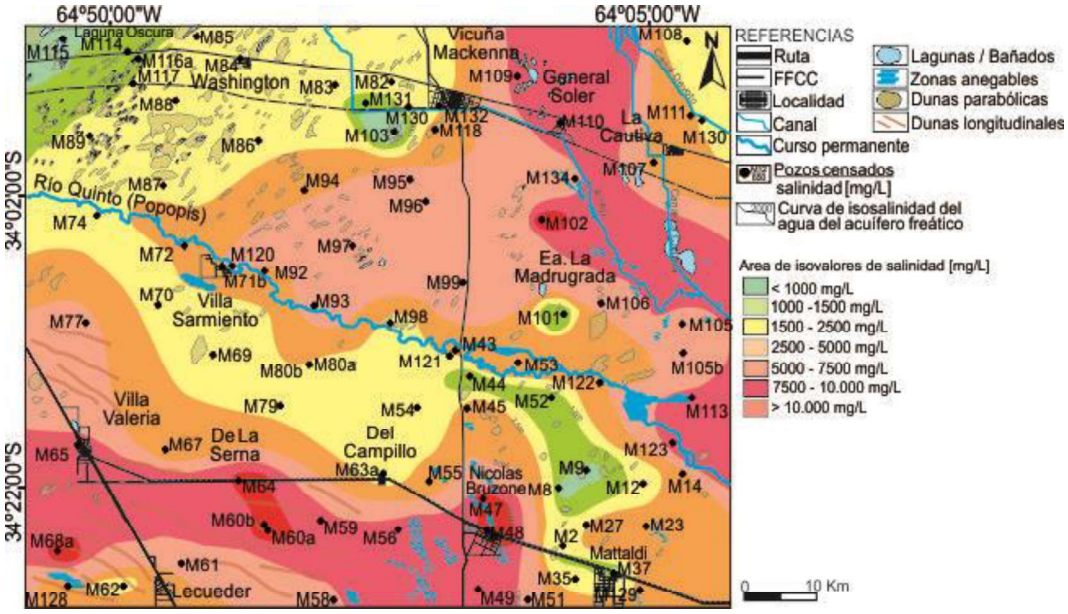


Figura 5. Mapa de salinidad del acuífero libre.

Las variaciones en la composición química del agua subterránea del área de estudio (ver Fig. 6a), permiten deducir una asociación con las unidades geomorfológicas definidas. Para validar el modelo conceptual se realizó el análisis estadístico multivariado de agrupamiento (cluster) en **Modo Q,** de manera tal que permita establecer cuáles son las asociaciones existentes entre la composición química del agua y las unidades geomorfológicas descriptas.

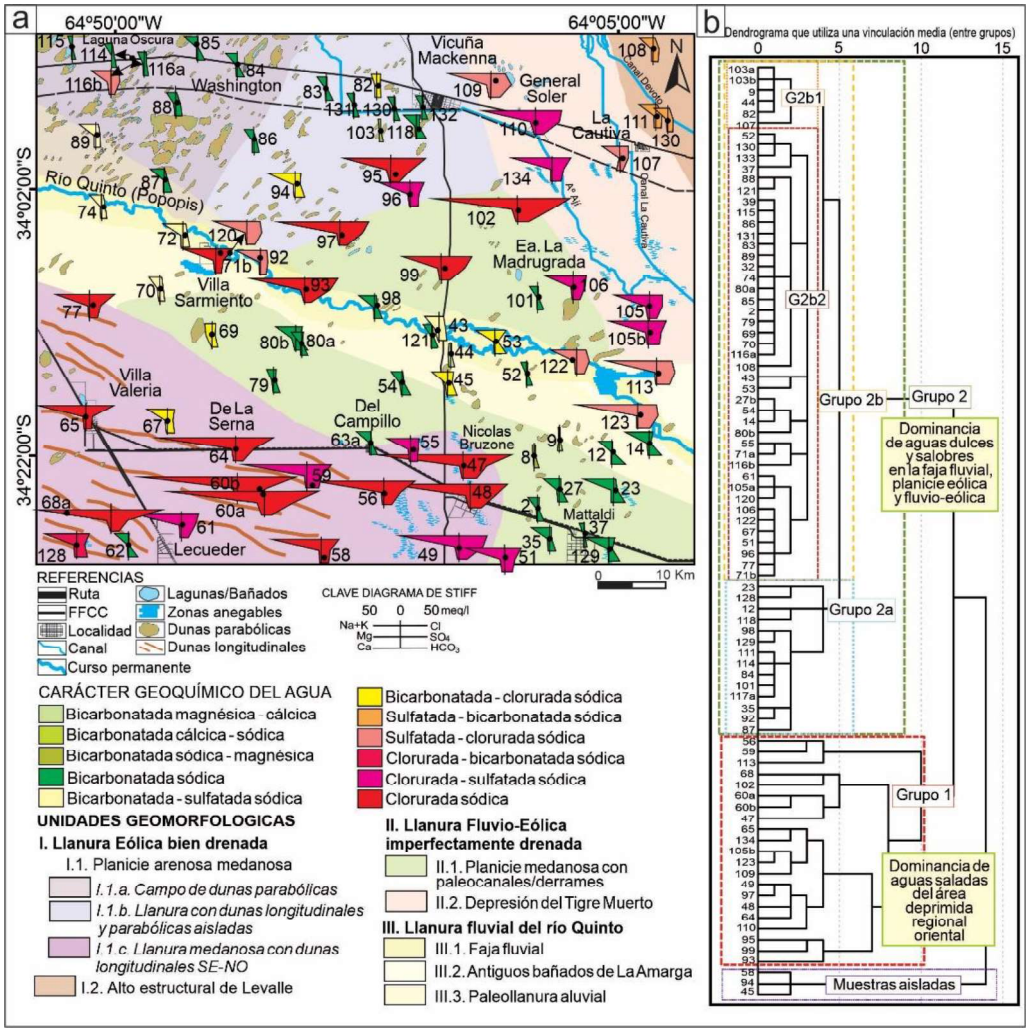


Figura 6. a. Mapa geoquímico del agua (diagramas de Stiff modificados). **b.** Diagrama Cluster en Modo Q (entre observaciones).

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADO

El análisis en Modo Q (ver Fig 6b), permite identificar dos grandes grupos, diferenciados por el contenido salino, el tipo geoquímico y el ambiente geomorfológico y 3 muestras aisladas (M45, M94 y M58), las cuales se encuentran afectadas por procesos de contaminación (dichos aspectos no serán tratados en este trabajo dado el objetivo del mismo). El grupo G_1, presenta aguas saladas, con valores de SDT > a 3.500 mg/L, del tipo geoquímico cloruradas sódicas, cloruradas sulfatadas sódicas y sulfatadas cloruradas sódicas. Se localizan específicamente en los paleoderrames mal drenados, la depresión de Tigre Muerto, los antiguos bañados de la Amarga y al Sur, entre Villa Valeria y Nicolás Bruzone, asociado con bajos hidrohalomórficos con dunas longitudinales imperfectamente drenadas. El grupo G_2, se caracteriza por presentar muestras de agua con SDT < a 3.500 mg/L, destacándose la presencia de dos subgrupos (2^a y 2^b), Fig. 6b. El subgrupo 2^a, presenta aguas dulces y salobres, mayormente del tipo bicarbonatadas sódicas. Desde el punto de vista geomorfológico, se asocian a la planicie eólica, específicamente a los cuerpos medanosos. El subgrupo 2^b, resulta más complejo con presencia de dos subgrupos (2^{b1} y 2^{b2}), reconociéndose en 2^{b1} aguas con bajos valores de SDT (455 – 2.500 mg/L) y carácter geoquímico dominantemente bicarbonatado. Las muestras se localizan en médanos y las aguas están vinculadas a recarga reciente (agua

de lluvia). En el subgrupo 2^{b2}, las aguas son dulces, salobres y saladas, con carácter geoquímico de tipo bicarbonatadas sódicas a cloruradas sódicas. Las aguas dulces se asocian a cuerpos medanosos, las salobres a la faja antigua y áreas de derrames del río Quinto, mientras que las saladas se ubican muy próximas a las áreas deprimidas (Grupo $G_{1)}$.

RELACIONES AGUA SUBTERRÁNEA - MÉDANOS: CONDICIONANTES HIDRODINÁMICOS E HIDROQUÍMICOS.

a. Aspectos morfo-litológicos de los médanos que puedan influenciar la dinámica y calidad del agua subterránea: En función de lo propuesto por Toth (1999) y de los aspectos hidrodinámicos discutidos anteriormente, se establece que los cuerpos medanosos, tanto fijos como removilizados, resultan ser para el área de estudio, zonas preferenciales de recarga de agua de lluvia hacia el acuífero (ver Fig. 7a). Datos del freatigrama (F_1 – M_{116}, ver Fig 7.) ubicado en la zona medanosa de Laguna Oscura (Bécher Quinodóz, 2014), exhibe formas típicas de picos de ascenso durante verano-principios de otoño debido a la fuerte influencia de las lluvias, obteniéndose en esa época los mayores porcentajes de recarga del acuífero libre.

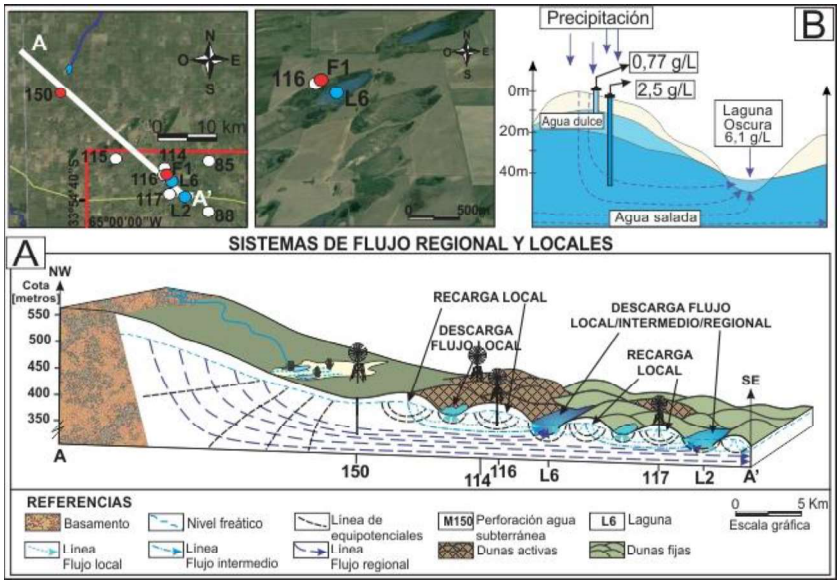


Figura 7 a. Sistemas de flujos de agua subterránea regionales y locales en el área de estudio. **b.** Variación del contenido salino del agua subterránea con la profundidad - sector Laguna Oscura.

Este aspecto influye en la calidad del agua subterránea, ya que en sectores que, desde el punto de vista hidrodinámico se observan como zonas de tránsito de flujos provenientes del sector occidental, la presencia de cuerpos medanosos cuya permeabilidad es superior a la del entorno, favorece la recarga y el desarrollo de lentes de agua dulce en la parte superior del acuífero (dada la diferencia de densidad con el agua salada), que se constituyen en reservas de agua, aptas para diversas actividades. A través del análisis de las muestras de agua obtenidas en el sector del freatígrafo, se pudo constatar el incremento de la salinidad en profundidad. En los primeros metros, el agua subterránea del acuífero libre presenta una salinidad menor a 1g/L, mientras que a partir de los 44 metros la salinidad resulto ser de 2,5 g/L (ver Fig. 7b). Aspectos similares se observan en la zona de Mattaldi (Blarasin et al., 2013), donde tareas de exploración hidrogeológica permitieron identificar en el sector medanoso una lente de agua dulce sobre el agua salada

encontrándose una importante reserva para abastecer a la localidad.

b. Aspectos de la dinámica del agua subterránea que pueden influenciar la morfología, distribución espacial y estabilidad de los cuerpos medanosos: Especificamente en lo relacionado al contenido de agua en los sedimentos, según Warren (2013), tiene un fuerte efecto de cohesión, pero es difícil, quizás imposible, medir el efecto completo. Aun así y dado que en la región existe fluctuación del nivel de agua subterránea, en algunos casos muy cercano a la superfcie, otorgando alta humedad al perfil del suelo, es que en este apartado se evalua la dinamica del agua subterránea como posible condicionante de la distribución y morfologia de los cuerpos medanosos.

Las zonas con mayor humedad edáfica son aquellas del sector SO, Sur y todas las del ámbito deprimido oriental, en las que la profundidad del nivel es escasa, y la franja capilar mayor, por lo que el estado de humedad del suelo es importante en todas las estaciones del año. En la zona oriental se suma al efecto capilar, la abundancia de sedimentos pelíticos que arribaron durante largos períodos. Como indica Lancaster y Baas, (1998), por encima de aproximadamente el 5% de contenido de humedad gravimétrica, el material arenoso es inherentemente resistente a la entrada del viento, lo que impedirá la movilización del material. Según Warren (2013) con contenidos de agua por encima de 75% directamente no hay movimiento de partículas. Un modo de cuantificar la probable influencia de la humedad del suelo (parcial o totalmente saturado) es emplear como indicador la profundidad del nivel freático y su relación con la presencia de cuerpos medanosos.

Para ello, se elaboró para el área de trabajo una grilla de 16 celdas de 475 km^2 cada una, colocada sobre los mapas de isoprofundidad de nivel freático y geomorfológico. De este modo, se evaluaron en cada celda de la grilla los rangos de profundidad de nivel y se contabilizó la cantidad de cuerpos medanosos para cada rango identificado. Las zonas con nivel freático menor a 2 m de profundidad, no muestran cuerpos medanosos, por lo que puede interpretarse que la gran humedad del perfil del suelo impide la movilización de sedimentos. Contrariamente, las áreas con zona de aireación o no saturada o mayor a 3 m son la que presentan gran cantidad de cuerpos reactivados. Se trata de dunas parabólicas complejas y compuestas de mediano porte, en general aisladas. Si bien el sector de mayor espesor de zona no saturada no posee la mayor cantidad de médanos, allí se alojan los de mayor tamaño (ver Fig. 8), que se presentan formando campos de dunas complejas y compuestas, solapadas entre sí, con menor intervención antrópica. Para las mismas profundidades del nivel freático se observó una distribución muy diferente al Norte y Sur del río Quinto: los campos de dunas dominan en el primer sector, y son muy escasos en el segundo. Considerando la dirección de vientos dominantes, la mayor disponibilidad de materiales se halla al Norte del curso, dado que el mismo ha desarrollado su paleoabanico fundamentalmente sobre su margen sur, lo cual implica, no sólo presencia de otros materiales, sino disipación y aporte de humedad vinculado al sistema superficial.

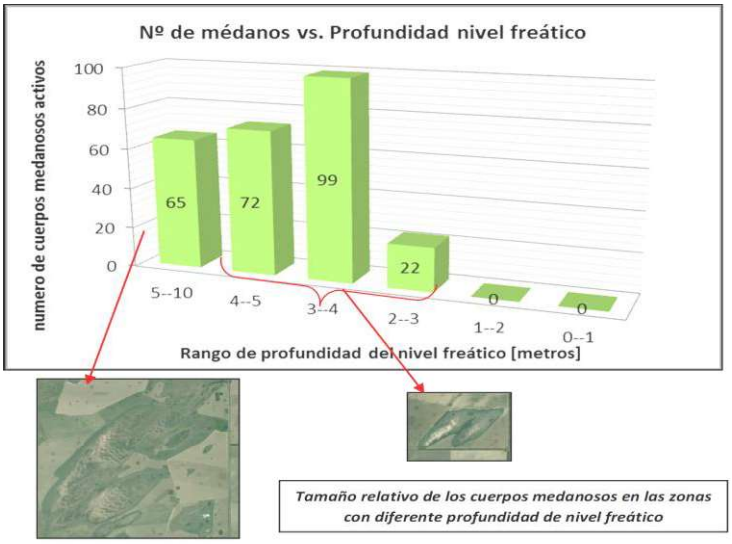


Figura 8. Número de médanos vs. Profundidad del nivel freático.

CONCLUSIONES

El estudio permite concluir desde el punto de vista geológico-geomorfológico que la zona presenta sólo relieves agradacionales del Pleistoceno Superior - Holoceno, resultantes de la interacción/interdigitación y yuxtaposición del Mar de Arena Pampeano, con el sistema fluvial del río Quinto. El área presenta una historia alternada de ciclos dominados por deflación y fundamentalmente agradación eólica con construcción de dunas, y otros de disipación de estas geoformas, actividad fluvial, instalación de lagunas y bañados y pedogénesis dominante. Estos ciclos se vinculan a cambios climáticos, períodos glaciares e interglaciares ocurridos durante el Cuaternario, que dieron como resultado un paisaje complejo y compuesto (palimpsesto) donde coexisten diferentes tipos de dunas: longitudinales pleistocenas y holocenas, parabólicas holocenas e históricas, barjanes y barjanoides recientes y extensas playas de deflación. Las zonas con nivel freático menor a 2 m de profundidad, no muestran cuerpos medanosos, por lo que puede interpretarse que la gran humedad del perfil del suelo impide la movilización de sedimentos. Contrariamente, las áreas con zona de aireación o no saturada o mayor a 3 m son la que presentan gran cantidad de cuerpos medanosos. El estudio hidrogeológico permitió definir un acuífero libre de 80 a 100 m de espesor de moderada homogeneidad litológica. Desde el punto de vista de la dinámica del acuífero libre se concluye que, así como el agua subterránea es parcialmente responsable de la distribución y tamaño de médanos, las direcciones de flujo, los gradientes hídricos y las velocidades del agua subterránea están condicionados a su vez por el relieve, y en menor grado, por cambios litológicos. Por su parte, los antecedentes y mediciones realizadas en la zona permitieron verificar fluctuaciones del nivel freático vinculadas fundamentalmente a la infiltración efectiva que llega al acuífero a partir de las precipitaciones, especialmente en zonas medanosas de alta conductividad hidráulica. El agua subterránea en la zona de estudio mostró un patrón geoquímico complejo, donde las aguas dulces bicarbonatadas se corresponden a muestras extraídas de perforaciones ubicadas cercanas a médanos activos, lomas topográficas y/o paleoderrames, donde se desarrollan sistemas de flujos locales que son el resultado de recarga reciente a partir de precipitaciones, debido a la presencia de sedimentos más gruesos vinculados a la historia fluvial y a los médanos activos. Por su parte, las aguas salobres y saladas, sulfatadas y cloruradas, son más evolucionadas y se consideran resultantes de un largo tránsito de flujos regionales, procedentes del sector occidental,

además condicionadas por los sedimentos finos dominantes y los bajos gradientes hidráulicos y velocidades del agua, lo que permite un largo tiempo de contacto agua – sedimento y, consecuentemente, procesos que favorecen la transferencia de iones a la solución. Los resultados del análisis estadístico multivariado de tipo cluster (Modo Q) permitió corroborar la relación que existe entre la calidad del agua subterránea y las unidades geomorfológicas. Se corrobora así que en el sector bajo estudio las características geomorfológicas (pendientes, tipo de sedimentos, etc.), participan del control de aspectos hidrodinámicos (gradientes y velocidad del agua) y consecuentemente influyen en forma notoria en las propiedades hidroquímicas del acuífero. Lo resultados obtenidos indican además la necesidad de estudios locales a futuro que permitan evaluar las aptitudes de uso para diferentes actividades y reservas de agua dulce disponibles en los sectores medanosos.

REFERENCIAS

APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WPCF (Water pollution Control Federation),. Standard methods for the examination of water and wastewater, 17th edn. Washington. (2017)

Bécher Quinodóz, F.N. Implicancias ambientales de las relaciones hidrodinámicas e hidroquímicas entre aguas superficiales y subterráneas en la planicie arenosa del Sur de Córdoba. Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), Río Cuarto, Córdoba. p 412. (2014)

Bécher Quinodóz F., Blarasin M., Cabrera A., Eric C., Felizzia, J. Groundwater Dynamics and Recharge Assessment in an Unconfined Aeolian Sand Aquifer. International Journal of New Technology and Research (IJNTR), 2 (5): 144-149. (2016)

Blarasin, M.; Cabrera, A.; Bécher Quinodóz, F.; Felizzia, J. y Giuliano Albo, J. El relieve y su incidencia en el hallazgo de agua para abastecimiento humano en la Planicie Medanosa Sudoriental Cordobesa. En: GONZÁLEZ, N. et al. Agua Subterránea Recurso Estratégico. Tomo I, EDULP, La Plata, p. 218-225. (2013)

Blarasin, M.; Cabrera, A y Matteoda, E. Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. 1ª ed. Río Cuarto: Editorial Universidad Nacional de Río Cuarto (UNIRIO), 2014.

Iriondo, M. Climatic changes in the South American plains: records of a continent-scale oscillation. Quaternary International,vol. 57, p. 93-112. (1999)

Lancaster, N., & Baas, A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, *23*(1), 69-82 (1998)

Latrubesse, E. M., & Ramonell, C. G. Landforms and chronology in the Pampean sand sea, Argentina. In *Abstracts Vol 18 International Sedimentological Congress, Mendoza, Argentina* (Vol. 529). (2010)

Pye, K. Late Quaternary development of coastal parabolic megadune complexes in northeastern Australia. *Aeolian sediments: ancient and modern*, 23-44. (1993)

Toth, J. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeology journal, vol. 7, Nº 1, p. 1-14. (1999).

Tripaldi, A., & Forman, S. L. Geomorphology and chronology of Late Quaternary dune fields of western Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *251*(2), 300-320. (2007).

Warren, C. *A history of the American bar*. Cambridge University Press. (2013)

CONTAMINACIÓN CON MICROPLÁSTICOS EN PECES DE LA COSTA PORTEÑA DEL RÍO DE LA PLATA

Carla M. Bonelli[a], Marcelo L. Morales Yokobori[ab]

[a]*Departamento de Biología, FCEN, Universidad de Belgrano, ARGENTINA.*
[b]*Mundus maris asbl, BÉLGICA.*

e-mail: dmp@comunidad.ub.edu.ar

RESUMEN

Entre los contaminantes presentes en aguas continentales y marinas están suscitando creciente preocupación en la comunidad científica los microplásticos, los cuales también pueden actuar como vectores de otros polutantes. Los plásticos sufren una degradación física y química que resulta de su exposición a factores ambientales como luz, viento y corrientes marinas, transformándose así en microplásticos, fracciones menores a 5mm. Se incluyen a las microfibras, propias de las prendas de vestir. Según nuestros resultados, estas últimas fueron las más frecuentemente encontradas en los peces del Río de la Plata. Se observaron que las distribuciones de fibras de distinto color entre dos especies de hábitos alimentarios diferenciados, Parapimelodus valenciennis y Megaleporinus obtusidens, no presentaban diferencias significativas, sugiriendo una distribución homogénea de estos microplásticos en las respectivas fuentes de alimentación. Se observaron también numerosas fibras azules desteñidas, las cuales podrían explicar la gran proporción de fibras claras encontradas.

Palabras Clave: Contaminación, Microplásticos, Rio de la Plata, Ictiofauna, Fibras sintéticas

INTRODUCCIÓN

Aunque, en general, solo un 10% de los residuos desechados comprenden plásticos, la proporción de acumulación en las costas suele resultar mucho mayor (Barnes et al, 2009). Los plásticos son la fracción más grande, dañina y persistente de los desechos marinos, representando por lo menos el 85% de estos (UNEP, 2021). Durante los últimos años se ha comprobado la presencia de microplásticos (MP) en las dietas de la fauna, tanto marina como de ríos, lagos y estuarios, en distintas partes alrededor del mundo (Pazos et al, 2018; Pazos et al, 2017; FAO, 2017; Wang et al, 2019; Hossain et al, 2019; Su et al, 2019). Aunque persisten los debates a la búsqueda de un consenso para una definición exhaustiva de los MP (Frias & Nash, 2019) es frecuente considerar estas piezas con un máximo de 5000 µm en longitud (GESAMP, 2015; GESAMP, 2016). Asimismo, para algunos autores se consideran como nanoplásticos las piezas con un tamaño inferior a 100 nm (Ng et al, 2018) si bien otro criterio toma como límite superior los 1000 nm (Gigault et al, 2018).

La presencia de contaminantes en el medio ambiente se ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas debido al alto nivel de producción y consumo, combinado con una gestión insatisfactoria de los residuos generados (Blettler et al, 2019). Particularmente, el desarrollo de tecnología para sintetizar polímeros modernos (Mattson et al, 2015; Bergmann et al, 2015) ha favorecido su uso masivo, considerando sus propiedades de durabilidad, elasticidad, bajo peso y reducido costo. Cobra relevancia el uso del poliéster, término utilizado en la industria textil para denominar al tereftalato de polietileno, conocido por sus siglas en inglés como PET (Gooch, 2011).

Según su origen, los MP se clasifican en primarios, es decir, aquellos cuyo tamaño original sin alteración ambiental resulta inferior a 5 mm, y secundarios, cuando dicho tamaño se alcanza por fragmentación en el ambiente, a partir de una pieza de mayor tamaño original (Prokić et al, 2021). Contrariamente a su lenta biodegradación, la degradación física de los plásticos en el ambiente marino es relativamente rápida, debido a las radiaciones solares, la dinámica de las aguas oceánicas, la abrasión y la interacción con organismos y barcos, convirtiendo con celeridad los objetos originales en fragmentos cada vez más pequeños (Prokić et al, 2021; Schirinzi et al, 2020; Pagano et al, 2019; Allen et al, 2019).

Es de significativa relevancia la propiedad que estos materiales presentan para adsorber otros contaminantes, tales como polutantes orgánicos persistentes y metales pesados, incrementándose así el riesgo para la salud tanto de las poblaciones de variados organismos como también para los eslabones superiores de la cadena trófica, incluida nuestra especie (Mendoza Muñoz, 2018; Caruso, 2019; Crawford & Quinn, 2017; Holmes et al, 2012; Mato et al, 2001). Es decir, los MP no sólo representan un riesgo en sí mismos, sino que también pueden actuar como vectores de otras sustancias. Se ha sugerido también que los MP pueden actuar como vectores de microbios con efectos patógenos generando riesgos ecológicos posteriores (Wang et al, 2019). En general, la contaminación puede alcanzar los cuerpos de aguas, tanto lóticos como lénticos, mediante vertido directo del ser humano, a través de escorrentías y desagües que conducen los desechos por las cuencas, o en la tropósfera por transporte de vientos y precipitaciones.

Adicionalmente, los plásticos contienen diversas sustancias dañinas que pueden alcanzar el torrente sanguíneo. Entre ellas, los ftalatos, que confieren elasticidad a materiales como el cloruro de polivinilo (PVC) y el tereftalato de polietileno (PET) (Henkel et al, 2019; Sax, 2010).

Desde mediados de la primera década de este siglo, se han incrementado la cantidad de estudios que interpretan el cambio climático y la basura marina como fenómenos que impactan en conjunto más que separadamente (Lincoln et al, 2022; Morales-Yokobori, 2020).

En el caso particular de la cuenca del Paraná-Río de la Plata, la polución resulta un factor de relevancia, dada la presencia sobre ella de importantes centros urbanos, así como de una diversidad de industrias y actividades agropecuarias (Morales Yokobori, 2020b). El estuario del Río de la Plata está formado por los desagües de los ríos Paraná y Uruguay (Isla, 2008). Entre el Río Paraná y el Río de la Plata se forma un delta, último macrosistema de una compleja red de humedales conocida como corredor fluvial Paraná-Paraguay-Sistema del Plata (Kandus et al, 2010). Este es el escenario de pesca de especies autóctonas que han servido de alimento y pesca deportiva a lo largo de la historia. Entre ellas, se pueden mencionar a la boga (*Megaleporinus obtusidens*), el pejerrey (*Odontesthes bonaerensis*), el bagre amarillo (*Pimelodus maculatus*), el bagre blanco (*Pimelodus albicans*), el dorado (*Salminus brasiliensis*), el pacú (*Piaracatus mesopotamicus*) y el sábalo (*Prochilodus lineatus*). Estas especies, con altos valores nutricionales (Abib M. et al, 2005; Abib M. et al, 2003; Espíndola, 2008), son capturadas también en el Río de la Plata.

Aunque desde la década de 1990 la pesca artesanal entró en crisis debido a la reducción en las poblaciones de peces (Ferrero & Arizpe Ramos, 2015), esta sigue siendo una actividad de relevancia económica y deportiva. El cambio climático global, así como otros factores antropogénicos de carácter local, incluyendo la pesca a nivel industrial y/o comercial, resultan en ingredientes que contribuyen a la vulnerabilidad de la riqueza

ictícola del Delta del Paraná (Medina & Codignotto, 2013; Kandus et al, Contribuciones al conocimiento de los humedales del Delta del Río Paraná, 2011).

Debido a las razones expuestas, la aparición de MP en el medio marino, incluidos los peces, se ha convertido en un área clave de investigación (Sun et al, 2019; Morales Yokobori, 2020a; Bonelli et al, 2019), aunque en las aguas continentales ha sido bastante menos estudiada (Dris et al, 2017; Wang et al, 2019). No obstante, en las costas de la ciudad de La Plata y sus alrededores, se obtuvieron resultados similares, sugiriendo así un problema general en las aguas del estuario (Pazos et al, 2017). Adicionalmente, estudios realizados en el Río de la Plata han probado la existencia de contaminación con MP en organismos fitoplanctónicos (Pazos et al, 2018).

Este trabajo es el primer estudio realizado sobre contaminación con MP en peces de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, constituyendo parte de la tesis de licenciatura en Ciencias Biológicas de Carla Bonelli.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Trabajo de campo

Las tomas de muestras se efectuaron en el Club de Pescadores, Costanera Norte, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, facilitado por un convenio entre la Universidad de Belgrano y dicha institución. Se obtuvieron individuos de *Pimelodus albicans*, *Parapimelodus valenciennis*, *Megaleporinus obtusidens*, *Pimelodus maculatus*, *Luciopimelodus pati*, *Serrasalmus spilopleura* y *Ageneiosus valenciennesi*, especies con hábitos alimenticios diferenciados entre sí. Tras el sacrificio eutanásico de los animales, capturados por los pescadores y gentilmente cedidos, se procedió a la extracción de los tractos digestivos conservando todos sus contenidos, para la posterior digestión de la fase orgánica conservando los materiales plásticos.

Trabajo de laboratorio

La digestión de la fase orgánica se realizó mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno 100 Vol. (solución al 30%) grado analítico Cicarelli, en vasos de precipitados sometidos a baño maría a 60-65°C. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada con resultados satisfactorios (Pazos et al, 2017; Li et al, 2016; Karami et al, 2017). En ocasiones se obtuvo un sobrenadante que se redujo mediante la aplicación de sodio lauril sulfato grado analítico.

La separación de los MP del fluido resultante se efectuó mediante filtración al vacío, con una bomba Dosivac de 170 l/m, en matraces Kitasato utilizando sobre embudo de cerámica membranas de nitrocelulosa con porosidad de 0,45µm y diámetro de 47mm, no estériles. Una vez terminada la filtración se dejaron secar las membranas conteniendo los materiales extraídos por filtración en un desecador.

Las mismas membranas, una vez secas, fueron observadas bajo un microscopio estereoscópico Bresser Researcher ICD LED/Accu 20-80X, mediante el cual se efectuaron la cuantificación y clasificación de los materiales plásticos encontrados. La observación y registro fotográfico se realizaron en computadora mediante un ocular Celestron HD Digital Microscope Imager modelo #44422.

Cálculos y elaboración de gráficos

Para los cálculos y la confección de gráficos se utilizó la herramienta Tablas dinámicas de Excel versión Microsoft 365. Para la evaluación de diferencias significativas entre muestras se utilizó la herramienta prueba F de Fisher, incluida en el mismo programa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde fines de invierno del 2019 hasta fines de verano del 2020, se muestrearon en total 33 individuos distribuidos de la siguiente forma: 8 porteñitos (*Parapimelodus valenciennis*), 12 bogas (*Megaleporinus obtusidens*), 5 bagres amarillos (*Pimelodus maculatus*), 4 patíes (*Luciopimelodus pati*), 3 palometas (*Serrasalmus spilopleura*) y 1 manduva (*Ageneiosus valenciennesi*). Todos los ejemplares presentaron MP en los contenidos de sus tractos digestivos, con un máximo hallado de 2127 fibras y 695 fragmentos en bogas y un mínimo de 22 fibras y 3 fragmentos en porteñitos. La boga puede ser considerablemente mayor al porteñito (Almirón et al, 2015).

Los materiales plásticos hallados variaron en forma, color y tamaño (ver Fig. 1), sugiriendo así fenómenos de distintos orígenes y procesos de dispersión en el ambiente. Predominaron en cantidad las microfibras, mayoritariamente de color transparente y blanco, seguidas de negro, azul y rojo (ver Fig. 2). Se estima que estas microfibras provienen de materiales sintéticos utilizados para la manufacturación de prendas de vestir.

Se observaron también numerosos pequeños fragmentos, en su mayoría irregulares, que podrían considerarse MP debido a su resistencia a la digestión orgánica, forma y colores que predominantemente resultaron rojo, negro, azul, transparente y blanco (ver Fig. 2).

Si bien las especies muestreadas presentan hábitos alimentarios diferenciados, se analizaron las proporciones de MP, tanto de fibras como de fragmentos, en los tractos digestivos de dichos individuos, encontrándose fibras claras (transparentes/ blancas/ amarillas, 70.19%), seguidas de negras (14.70%), azules (7.49%), rojas (7.04%) y verdes (0.58%) (ver Fig. 2). En otro estudio realizado en la primavera de 2019, las proporciones de fibras encontradas en muestras de sedimentos de playas de Quilmes, Puerto Madero y Vicente López resultaron 34,49% transparentes, 16,98% negras, 30,82% azules y 6,29% rojas, sin indicar presencia de verdes (Lacava et al, 2022). De esos puntos de muestreo, los mismos autores señalan que los sitios más afectados con fibras fueron Puerto Madero y Vicente López, ubicándose el Club de Pescadores geográficamente entre ellos. Una gran diferencia observada resulta de comparar las proporciones de fibras azules y de fibras claras entre los muestreos realizados en este trabajo y los sedimentarios citados.

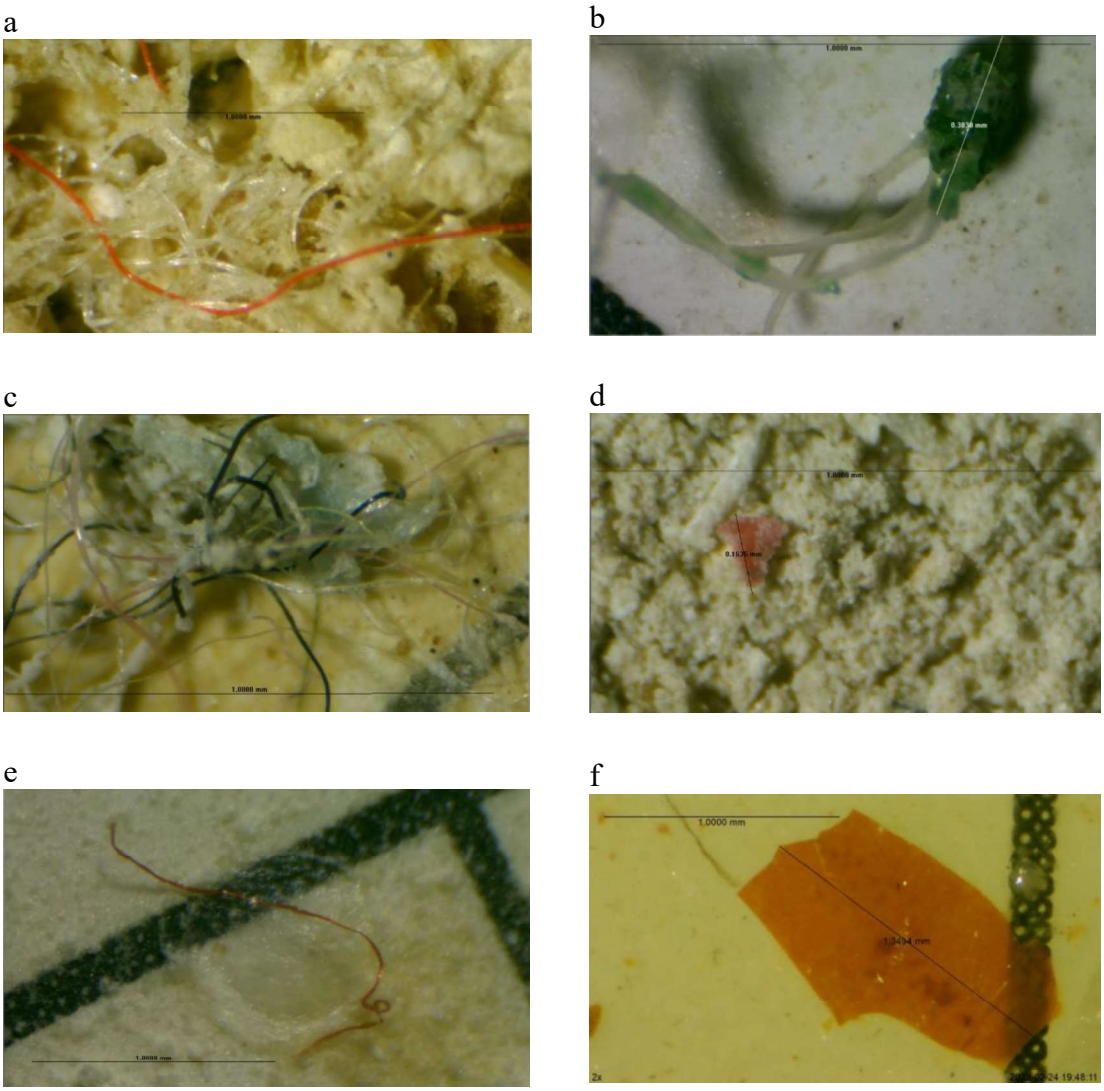


Figura 1. Microplásticos hallados en peces capturados en la costa del Club de Pescadores de Buenos Aires entre fines de invierno del 2019 y fines de verano del 2020. **a.** Conglomerado de fibras rojas y transparentes (*Pterodoras granulosus*). **b.** Fragmento verde fusionado a fibras (*Megaleporinus obtusidens*). **c.** Conglomerado de fibras negras, blancas, transparentes y rojas *(Parapimelodus valenciennis*). **d.** Fragmento rojo *(Parapimelodus valenciennis*). **e.** Fibra roja (*Serrasalmus spilopleura*). **f.** Fragmento rojo (*Megaleporinus obtusidens*).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

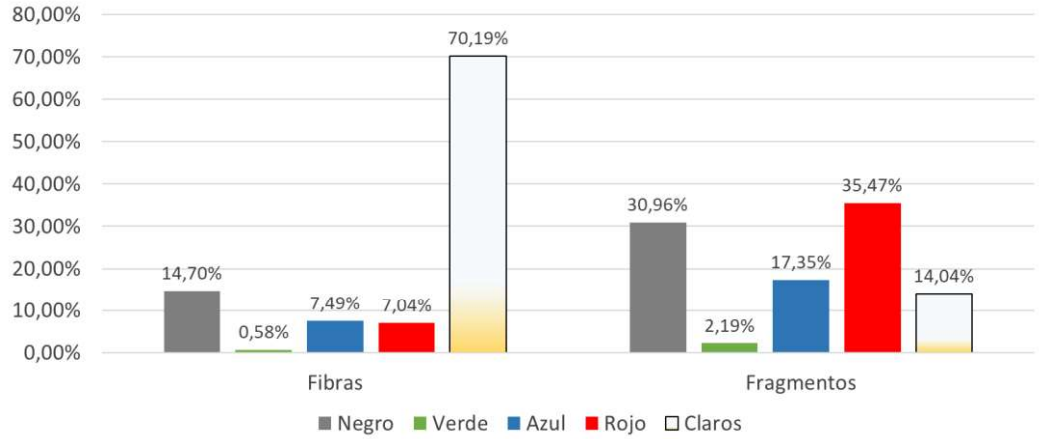


Figura 2. Proporciones de microplásticos encontrados en los tractos digestivos de los peces capturados en el muelle del Club de Pescadores de Buenos Aires, sede central, Argentina, desde fines de invierno de 2019 hasta fines de verano de 2020. Cantidad de individuos: 33 para fibras y 30 para fragmentos

Al mismo tiempo, se observaron reiteradamente fibras transparentes parcialmente teñidas de azul, como si estuviesen sufriendo o hubiesen sufrido algún proceso de destiñe (ver Fig. 3), no registrándose repetidamente este fenómeno con MP de otros colores. Las fibras de poliéster, ampliamente utilizadas en la industria textil, son originalmente blancas a transparentes, según la proporción de las estructuras amorfa o cristalina (Demirel et al, 2011). Luego, se las someten a un proceso de tinción que llega hasta las prendas de vestir. De esta manera, la evidencia sugiere la posibilidad de que tanto en el ambiente y en el tracto digestivo de los peces, así como en los procesos digestivos para analizar estas muestras, se haya producido un destiñe de fibras azules para quedar como transparentes a blancas.

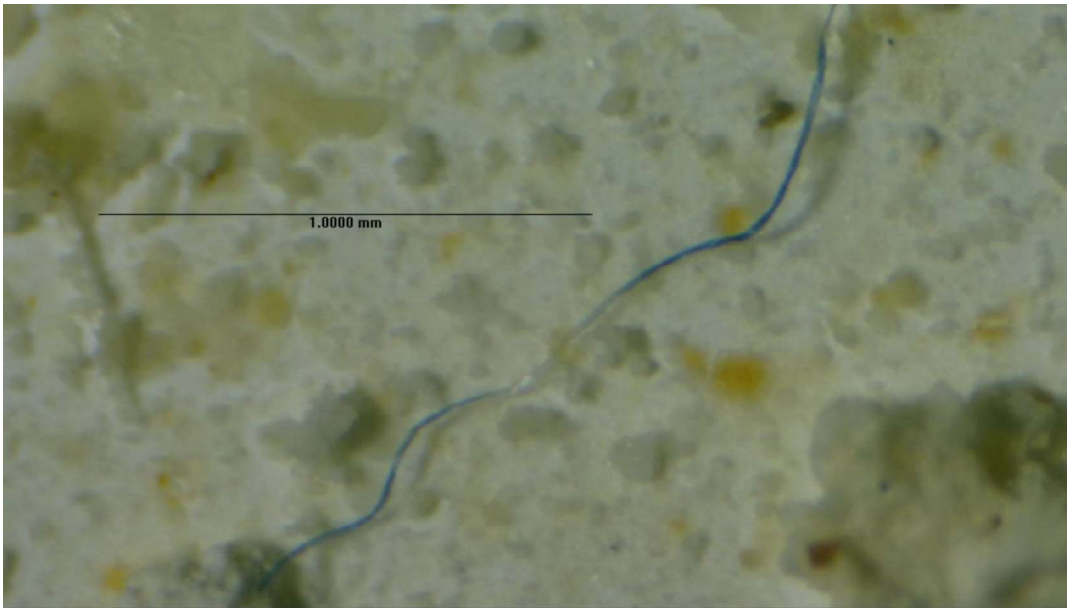


Figura 3. Fibra azul con signos de destiñe encontrada en un ejemplar de patí *(Luciopimelodus pati*) capturado en el Club de Pescadores de Buenos Aires, el 13 de enero de 2020. Aumento 40 X.

Se analizaron las diferencias significativas entre la boga y el porteñito respecto a las proporciones de fibras de distinto color halladas en los individuos muestreados de estas especies (ver Tabla I). Se obtuvo una probabilidad del 95% de diferencias no significativas entre las varianzas de ambas matrices de proporciones de color de fibra versus individuo. Este resultado contrastó con el 53% obtenido para las mismas especies cuando se consideraron a los fragmentos.

Tabla I. Proporciones promediadas de fibras de distinto color, obtenidas de muestreos en el Club de Pescadores de Buenos Aires, sede central, desde fines de invierno de 2019 hasta fines de verano de 2020.

		Color de fibra				
Especie	**Individuos**	**Negro**	**Verde**	**Azul**	**Rojo**	**Claro**
Megaleporinus obtusidens	12	16,57%	1,02%	9,22%	8,61%	64,58%
Parapimelodus valenciennis	8	15,49%	0,63%	9,82%	7,13%	66,93%

Para la boga, se analizó la relación entre presencia de elementos de microplásticos en tracto digestivo y peso de cada individuo. Se observó que los dos individuos más pesados, de los 6 capturados en el Club de Pescadores de Buenos Aires, sede central, el 11 de septiembre de 2019, presentaron considerablemente menor cantidad de elementos, mientras que los cuatro primeros mostraron una relación de tendencia lineal creciente (ver Fig. 4). La edad de primera madurez de la boga se estima en alrededor de 20 cm (da Graça & Pavanelli, 2007) y solo un ejemplar estuvo levemente debajo de esa longitud total.

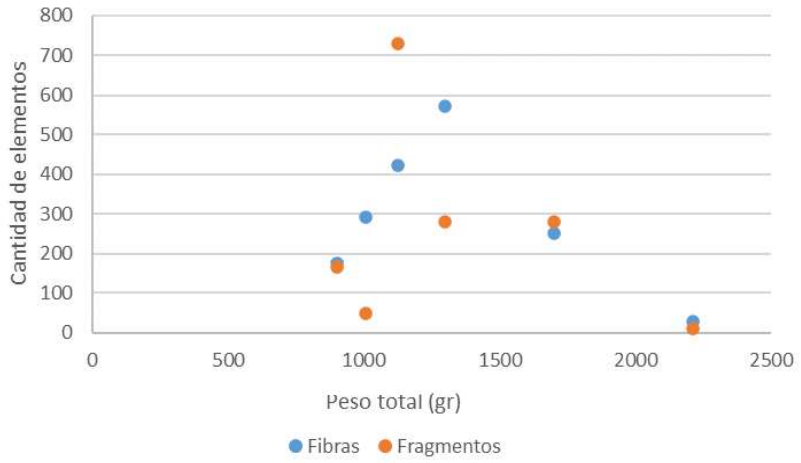


Figura 4. Relación entre cantidad de elementos de microplásticos y peso de cada individuo encontrados para la boga (*Megaleporinus obtusidens*) en el Club de Pescadores de Buenos Aires, sede central, el 11 de septiembre de 2019. Cantidad de ejemplares: 6.

Los MP, incluidas las fibras, han sido encontrados en la troposfera sobre grandes ciudades como París, en Francia, y Dongguan, en China (Allen et al, 2019; Dris et al, 2017). Dris *et al* (2017) indican también que las fibras que encontraron en la contaminación del aire son las mismas que las que ocurren en el medio marino. Los eventos de precipitación han sido sugeridos como eventuales conductores de las deposiciones atmosféricas de MP (Dris et al, 2016). Además, las escorrentías urbanas que convergen a las alcantarillas limpian el suelo de la ciudad, descargando directamente hacia el Río de la Plata. Las tendencias crecientes de precipitación sobre la cuenca del Plata han sido observadas por varios investigadores (Cavalcanti et al, 2015). En particular, se ha observado que las

lluvias han cambiado considerablemente en la ciudad de Buenos Aires durante las últimas décadas (Scian & Pierini, 2013) incluyendo su distribución estacional (Morales-Yokobori, 2020).

CONCLUSIONES

El alcance de la contaminación con microplásticos, tanto en términos de especies como temporal, en la ictiofauna de las aguas cercanas a la costa de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires resulta relevante y merece la debida atención, dado que estos materiales pueden liberar sustancias nocivas para el pez como por la capacidad que tienen como vectores de otros polutantes, considerando además que las sucesivas fragmentaciones aumentan la superficie total de interacción de estos elementos con el ambiente.

Al mismo tiempo, la actual ocurrencia de fibras de microplásticos en el medio podría ser utilizada para contribuir al conocimiento de los hábitos alimentarios de las distintas especies y sus poblaciones, al servir como eventuales marcadores. La alta similitud de proporciones de colores de fibras entre la boga y el porteñito es un ejemplo de ello; aunque a priori no confirma ningún resultado específico en términos biológicos, es una información adicional que podría cruzarse con otra para acercar eventuales conclusiones.

No necesariamente existe una relación directa o lineal entre peso del individuo y contaminación con microplásticos en tractos digestivos, sino que distintos tamaños podrían también significar distintas fuentes de alimentación.

REFERENCIAS

Abib, M., Freyre, M., Fontanarrosa, M., Del Barco, D., & Ferraris, N. (2003). Calidad nutricional de las grasas de pescados del río Paraná de consumo masivo en Santa Fe. *Revista FABICIB, 7*, 127-133.

Abib, M., Freyre, M., Palmioli, N., Del Barco, D., & Ferraris, N. (2005). Contenido en colesterol en porción comestible de peces del valle aluvial del Río Paraná. *Revista FABICIB, 9*, 111-114.

Allen, S., Allen, D., Phoenix, V., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., . . . Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *nature geoscience, 12*, 339–344. https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5

Almirón, A., Casciotta, J., Ciotek, L., & Giorgis, P. (2015). *Guía de los peces del Parque Nacional Pre-Delta.* Administración de Parques Nacionales.

Barnes, D., Galgani, F., Thompson, R., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastics debris in global environments. *Philosophical Transactions of The Royal Society*(364), 1985-1998. https://doi.org/doi:10.1098/rstb.2008.0205

Bergmann, M., Gutow, L., & Klages, M. (2015). *Marine Antropogenic Litter.* Springer Open. https://doi.org/DOI 10.1007/978-3-319-16510-3

Blettler, M. C., Garello, N., Ginon, L., Abrial, E., Espinola, L. A., & Wantzen, K. M. (2019). Massive plastic pollution in a mega-river of a developing country: Sediment deposition and ingestion by fish (Prochilodus lineatus). *Environmental Pollution* https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113348

Bonelli, C., Pazos, R. S., & Morales-Yokobori, M. L. (2019). Contaminación con microplásticos en la ictiofauna del Río de la Plata, Costanera Norte, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. *VI Congreso Nacional de Conservación de la Biodiversidad.* La Rioja.

Caruso, G. (2019). Microplastics as vectors of contaminants. *Marine Pollution Bulletin*(146), 921-924. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.07.052

Cavalcanti, I., Carril, A., Penalba, O., Grimm, A., C.G., M., Sanchez, E., Flach, R. (2015). Precipitation extremes over La Plata Basin
Review and new results from observations and climate simulations. (523), 211-230. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028
Crawford, C., & Quinn, B. (2017). 6-The interactions of microplastics and chemical pollutants. En C. Crawford , & B. Quinn,
Microplastics Pollutants (págs. 131-157). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809406-8.01001-X
da Graça, W. J., & Pavanelli, C. S. (2007). *Peixes da planicie de inundaçao do Alto Rio Paraná e Áreas Adjacentes.* Maringá.
Demirel, B., Yaraş, A., & Elçiçek, H. (2011). Crystallization Behavior of PET Materials. *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi , 13*(1), 26-35.
Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., & Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*(221), 453-458. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028
Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin, 15*(1-2), 290-293.
Espíndola, B. I. (2008). *Variaciones en el contenido de macro y micronutrientes de pescado de río sometidos a cuatro formas de cooción.* Esperanza: Universidad Nacional del Litoral.
FAO. (2017). *Microplastics in fisheries and aquaculture.* Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
Ferrero, B. G., & Arizpe Ramos, N. G. (2015). Pescadores artesanales del Bajo Paraná Argentino: entre la complejidad y la tragedia de los comunes. *AVÁ-Revista de Antropología, 26*, 61-81.
Frias, J., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin, 138*, 145-147. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022
GESAMP. (2015). *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment (Part 1).* International Maritime Organization. http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90
GESAMP. (2016). *Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment (Part 2).* International Maritime Organization. http://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment-part-2
Gigault, J., ter Halle, A., Baudrimont, M., Pascal, P.-Y., Gauffre, F., Phi, T.-L., Reynaud, S. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution, 235*, 1030-1034. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024
Gooch J. W. (2011). Encyclopedic Dictionary of Polymers. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6247-8_9084
Henkel, C., Hüffer, T., & Hofmann, T. (2019). The leaching of phthalates from PVC can be determined with an infinite sink approach. MethodX, 6, 2729-2734. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.mex.2019.10.026
Holmes, L., Turner, A., & Thompson, R. (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. Environmental Pollution, 160, 42-48. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.052
Hossain, M. S., Sobhan, F., Nasir Uddin, M., Sharifuzzaman, S., Rahman Chowdhury, S., Sarker, S., & Nawaz Chowdhury, M. S. (2019). Microplastics in fishes from the Northern Bay of Bengal.
Isla, F. I. (2008). ENSO-dominated estuaries of Buenos Aires: The interannual transfer of water from Wetern to Easter South America. *Global and Planetary Change, 64*, 69-75. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.09.002
Kandus, P., Minotti, P., & Borro, M. (2011). *Contribuciones al conocimiento de los humedales del Delta del Río Paraná.* Buenos Aires: Universidad Nacional de General San Martín.

Kandus, P., Morandeira, N., & Schivo, F. (2010). *Bienes y Servicios Ecosistémicos de los Humedales del Delta del Paraná.* Buenos Aires: Wetlands International - Fundación Humedales.

Karami, A., Golieskardi, A., Keong Choo, C., Romano, N., Bin Ho, Y., & Salamatinia, B. (2017). A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish. *Science of The Total Environment, 578*, 485-494. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.213

Lacava, J., Schmaedke, A., Denaro, M., Bernabeu, P., & Gargarello, R. (2022). Evaluación de la presencia de microplásticos en playas del Río de la Plata: Ciudad de Buenos Aires y alrededores. *Revista AIDS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Invvestigación, desarrollo y practica, 15*(3), 1163- https://doi.org/dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.3.80815

Li, J., Qu, X., Su, L., Zhang, W., Yang, D., Kolandhasamy, P., . . . Shi, H. (2016). Microplastics in mussels along the coastal waters of China. *Environmental Pollution, 214*, 177-184. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.012

Lincoln, S., Andrews, B., Birchenough, S. N., Chowdhury, P., Engelhard, G. H., Harrod, O., . . . Townhill, B. L. (2022). Marine litter and climate change: Inextricably connected threats to the world's oceans. *Science of The Total Environment, 837*. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155709

Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment. *Environmental Science Technology, 35*, 318-324. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11347604/

Mattson, K., Hansson, L.-A., & Cedervall, T. (2015). Nano-plastics in the aquatic environment. *Environmental Science: Processes and Impacts*(17), 1712-1721. https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C5EM00227C

Medina, R. A., & Codignotto, J. O. (2013). Evolución del delta del río Paraná y su posible vinculación con el calentamiento global. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, 15*(2), 191-200.

Mendoza Muñoz, N. (2018). *Adsorción de contaminantes en microplásticos en ambientes.* Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana. http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/6723/Adsorcion_de_contaminantes_Mendoza_Munoz_N_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Morales Yokobori, M. L. (4 de mayo de 2020a). Hallan microplásticos en los peces de la costa porteña del Río de la Plata. (R. Martínez, Entrevistador) Argentina Investiga. https://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=hallan_microplsticos_en_los_peces_de_la_costa_portea_del_ro_de_la_plata&id=3699

Morales Yokobori, M. L. (28 de septiembre de 2020b). Los recursos marinos argentinos y sus amenazas. (M. C., Degrossi, Entrevistador) https://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=los_recursos_marinos_argentinos_y_sus_amenazas&id=3824

Morales-Yokobori, M. L. (2020). Contribution to the understanding of rainfalls occurring in Buenos Aires city (Argentina) between 1960 and 2018. *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (2nd Edition): Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-2), Tunisia 2019.* Soussa: Springer.

Ng, E.-L., Huerta Lwanga, E., Eldridge, S. M., Johnston, P., Hu, H.-W., Geissen, V., & Chen, D. (2018). An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment, 627*(1377-1388). https://doi.org/doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341

Pagano, M., V. I., G. A., & Caracappa, G. F. (2019). Hematological and biochemical parameters in Sea turtles (Caretta caretta) after stranding). *Regional Studies in Marine Science, 32*, 100832. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100832.

Pazos, R. S., Bauer, D. E., & Gómez, N. (2018). Microplastics integrating the coastal planktonic community in the inner zone of the Río de la Plata estuary (South America). *Environmental Pollution*(243), 134-142.

Pazos, R. S., Maiztegui, T., Colautti, D. C., Paracampo, A. H., & Gómez, N. (2017). Microplastics in gut contents of coastal freshwater fish from Río de la Plata estuary. *Marine Pollution Bulletin, 122*(1-2), 85-90. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.007

Prokić, M. D., Gavrilović, B. R., Radovanović, T. B., Gavrić, J. P., Petrović, T. G., Despotović, S. G., & Faggio, C. (2021). Studying microplastics: Lessons from evaluated literature on animal model organisms and experimental approaches. *Journal of Hazardous Materials, 144*, 125476. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125476

Sax, L. (2010). Polyethylene Terephthalate May Yield Endocrine Disruptors. *Environmental Health Perspectives, 118*(4), 445-448. https://doi.org/ doi:10.1289/ehp.0901253

Schirinzi, G. F., Pedà, C., Battaglia, P., Laface, F., Galli, M., Baini, M., Romeo, T. (2020). A new digestion approach for the extraction of microplastics from gastrointestinal tracts (GITs) of the common dolphinfish (Coryphaena hippurus) from the western Mediterranean Sea, *Journal of Hazardous Materials,, 397*, 122794. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122794

Scian, B., & Pierini, J. (2013). Variability and trends of extreme dry and wet seasonal precipitation in Argentina. A retrospective analysis. *Atmósfera, 26*(1), 6. http://www.scielo.org.mx/pdf/atm/v26n1/v26n1a2.pdf

Su, L., Deng, H., Li, B., Chen, Q., Pettigrove, V., Wu, C., & Shi, H. (2019). The occurrence of microplastic in specific organs in commercially caught fishes from coast and estuary area of east China. *Journal of Hazardous Materials, 365*, 716-724. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.024

Sun, X., Li, Q., Shi, Y., Zhao, Y., Zheng, S., Liang, J., . . . Tian, Z. (2019). Characteristics and retention of microplastics in the digestive tracts of fish from Yellow Sea. *Environmental Pollution*(249), 878-885. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.110

UNEP. (21 de Octubre de 2021). *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. UN Environment Programme: https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution

Wang, W., Gao, H., Jin, S., Li, R., & Na, G. (2019). The ecotoxicological effects of microplastics on aquatic food web, from primary producer to human: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 173*, 110-117. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.113

Wang, Z., Qin, Y., Li, W., Meng, Meng, Q., & Yang, J. (2019). Microplastic contamination in freshwater: first observation in Lake Ulansuhai, Yellow River Basin, China. *Environmental Chemistry Letters, 17*, 1821–1830. https://doi.org/doi.org/10.1007/s10311-019-00888-8

PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA EN EL MUSEO ESTÉVEZ, ROSARIO, PCIA. DE SANTA FE

María Victoria Bongiovanni[a], Patricia Martinelli[b], Peter Zabala Medina[c], Fernando Oliva[d]

[a]*Facultad de Ingeniería – Universidad Austral, LIDTUA (CIC)-CONICET, ARGENTINA*
[b]*Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental – Departamento de Física, FCEN, UBA e IFIBA-CONICET, ARGENTINA*
[c]*Becario Doctoral CONICET - FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*
[d]*Centro de Estudios Arqueológicos Regionales, Facultad de Humanidades y Artes, UNR, ARGENTINA*

email: mbongiovanni@austral.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue realizar prospecciones geofísicas en el hall central del Museo de Arte Decorativo Firma y Odilo Estévez. Este se encuentra en Rosario, Provincia de Santa Fe. Al iniciar obras de reconstrucción de los desagües pluviales del inmueble se encontraron hallazgos arqueológicos: distintos tipos de cerámica que serían parte de los cimientos del edificio, y fragmentos de cerámica anteriores a los últimos propietarios de la casa. A esto se sumó la presencia de un muro soterrado que no respeta la partición urbana y la cuadrícula que la ciudad tenía por entonces, lo que hace pensar que podría ser de una construcción previa. El hallazgo motivó profundizar en el estudio del sitio, ya que se está frente a la posibilidad de encontrar restos de los primeros muros de la ciudad. El objetivo de nuestro trabajo ha sido estudiar todo el hall central a fin de localizar muros antiguos, especialmente aquellos que conformarían la estructura de un pozo de agua. Se aplicó el método de prospección geofísica georradar, con cobertura de alta densidad en toda la superficie, cuyas dimensiones son 6m x 16m aproximadamente, entre los días 17 y 19 de septiembre de 2021. El hecho de que el terreno estuviera liso en superficie y de que el medio tuviera baja humedad y no fuera demasiado arcilloso, sumado a la cobertura de alta densidad, permitieron la óptima detección de anomalías, a partir de una interpolación 3D de los datos. La localización de las mismas posibilitó un plan de excavación, el cual fue completado en noviembre de 2021. La correlación existente entre lo hallado mediante la excavación y las anomalías detectadas con el georradar, permitieron tanto validar la técnica con este último método geofísico, como valorar el trabajo interdisciplinario geo-arqueológico.

Palabras Clave: Georradar, Museo Estévez, Arqueogeofísica.

INTRODUCCIÓN

Objetivo

El objetivo de este trabajo fue realizar prospecciones geofísicas en el hall central del Museo de Arte Decorativo Firma y Odilo Estévez. Este se encuentra en Santa Fe 738, Rosario, Provincia de Santa Fe. Esta casona fue la residencia de la familia Estévez hasta 1966, año en que Firma Mayor de Estévez la donó íntegramente a la Municipalidad de Rosario, con su mobiliario, colecciones de arte y decoraciones en honor de su esposo Odilio Estévez. En 1968 se inauguró oficialmente como museo. Forma parte, desde 1997, del Conjunto Urbano Arquitectónico de Interés Nacional, siendo declarado Monumento Histórico y Artístico de la Nación en 2010, ante el reconocimiento de la Comisión Nacional de Museos y de Monumentos y Lugares Históricos.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Al iniciar obras de reconstrucción de los desagües pluviales del inmueble se encontraron hallazgos arqueológicos: distintos tipos de cerámica que serían parte de los cimientos del edificio, y otra cerámica que probablemente sea de los anteriores propietarios de la casa. A esto se sumó la presencia de un muro soterrado que no respeta la partición urbana y la cuadrícula que la ciudad tenía por entonces, lo que hace pensar que podría ser de una construcción previa. El hallazgo motivó profundizar en el estudio del sitio, ya que se está frente a la posibilidad de encontrar restos de los primeros muros de la ciudad.

El objetivo de nuestro trabajo ha sido estudiar todo el hall central, a fin de localizar muros antiguos, especialmente aquellos que conformarían la estructura de un pozo de agua. Se aplicó el método de prospección geofísica georradar (GPR).

Método GPR

Mediante la aplicación del método GPR, se pueden obtener imágenes 3D del subsuelo de alta resolución, a partir de mediciones realizadas en superficie. Este método es no invasivo y no destructivo y, por lo tanto, resulta especialmente útil para la detección y caracterización de estructuras arqueológicas enterradas. Además de esto, también tiene amplias aplicaciones en otras áreas relevantes, como por ejemplo, diversos temas ambientales e ingenieriles (Grandjean et al, 2000; Benedetto et al, 2016; Xiao et al, 2018).

Este método se viene aplicando exitosamente en Arqueología desde hace algunas décadas (Buscaglia et al, 2008; Bonomo et al, 2016; Ratto et al, 2019). De hecho, ha surgido una rama interdisciplinaria, la Prospección Arqueológica, cuyo objetivo principal es la resolución de problemas arqueológicos utilizando métodos físicos y químicos.

Las razones por las cuales se han comenzado a utilizar las técnicas geofísicas en particular, y especialmente el georradar, son varias. Cuando se tienen indicios o bien se conoce la existencia de restos arqueológicos en un sitio, ya sea por datos previos de distinto tipo y/o excavaciones de sondeo, definir si es conveniente excavar y en qué sectores hacerlo es un problema no trivial. Las imágenes 3D del subsuelo obtenidas de una prospección geofísica aportan información complementaria, de gran utilidad para una mejor toma de esas decisiones. En particular, dichas imágenes permiten, de manera no invasiva y no destructiva, detectar la presencia de materiales enterrados, restos de paredes, túneles, basamentos, etc., mapear aproximadamente la forma de esas estructuras, y en ocasiones, hasta estimar el grado de conservación de las mismas. Así, el uso de los métodos geofísicos ayuda a optimizar las excavaciones, lo que a su vez contribuye a la preservación de las estructuras de interés.

El método GPR consiste en enviar dentro de la tierra una señal, que es una onda electromagnética de corta duración -o pulso-, de alta frecuencia, generado por una antena transmisora ubicada sobre la superficie del suelo, y medir el intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión de esa señal y la recepción de las ondas reflejadas en las distintas capas del subsuelo, realizada por una antena receptora, también ubicada sobre la superficie del suelo. Este intervalo de tiempo va a depender de la velocidad a la que viajan las ondas y de las profundidades a las que se producen las reflexiones de la onda incidente, que ocurren cada vez que cambia la permitividad eléctrica del medio. La profundidad de penetración y la resolución de GPR dependen de la frecuencia de la

onda electromagnética utilizada y de las características eléctricas del terreno. Justamente, las variaciones en la profundidad de penetración con los parámetros eléctricos permiten la discriminación de los distintos materiales geológicos y culturales. Con métodos de interpretación adecuados se puede inferir qué estructuras generan las respuestas medidas. En general, el radar es desplazado sobre el área a estudiar a una velocidad constante y moderada, a lo largo de líneas o perfiles rectos, paralelos entre sí. La antena transmisora va emitiendo pulsos constantemente, conforme el equipo va avanzando a lo largo de cada perfil. El operador puede ver en una pantalla un gráfico de la amplitud de las ondas reflejadas detectadas por la antena receptora en cada posición, en función del tiempo transcurrido desde que se emite cada señal. Este gráfico 2D, en el cual el eje horizontal corresponde a la posición y el vertical al tiempo, se denomina radargrama (en este caso es un radargrama de datos crudos).

Para reducir el ruido electromagnético de los datos de GPR e incrementar la amplitud de las señales de interés, es necesario aplicar a estos datos distintos métodos de procesado numérico. Una elección correcta de los métodos a ser aplicados en cada sitio en particular es crucial para lograr una interpretación adecuada de los resultados obtenidos y una caracterización detallada y confiable de las estructuras enterradas. En la actualidad, hay disponibles numerosos programas para realizar este proceso, luego del cual se obtienen también radargramas, pero de datos procesados.

Es importante señalar que en ambos tipos de radargramas el tiempo puede ser convertido en profundidad, si se conoce la velocidad a la que viajan las ondas en el subsuelo.

Finalmente, si la separación entre las líneas de adquisición es suficientemente baja, a los radargramas se les puede aplicar un procedimiento denominado interpolación, que permite construir volúmenes 3D de los datos en las áreas estudiadas. A partir de estos volúmenes 3D pueden obtenerse cortes de los datos a tiempo constante (que corresponde a profundidad constante). Estos cortes resultan especialmente útiles en el caso de aplicaciones arqueológicas, ya que ayudan mucho para la detección de rasgos con las típicas geometrías asociadas a estructuras de origen antrópico, como por ejemplo, rasgos lineales, circulares, ángulos rectos, etc. (Osella y Lanata, 2006).

El equipo utilizado en este sitio fue un georadar Pulse EKKO PRO de Sensors & Software, con antenas de frecuencia nominal 500 MHz (ver Fig. 1).

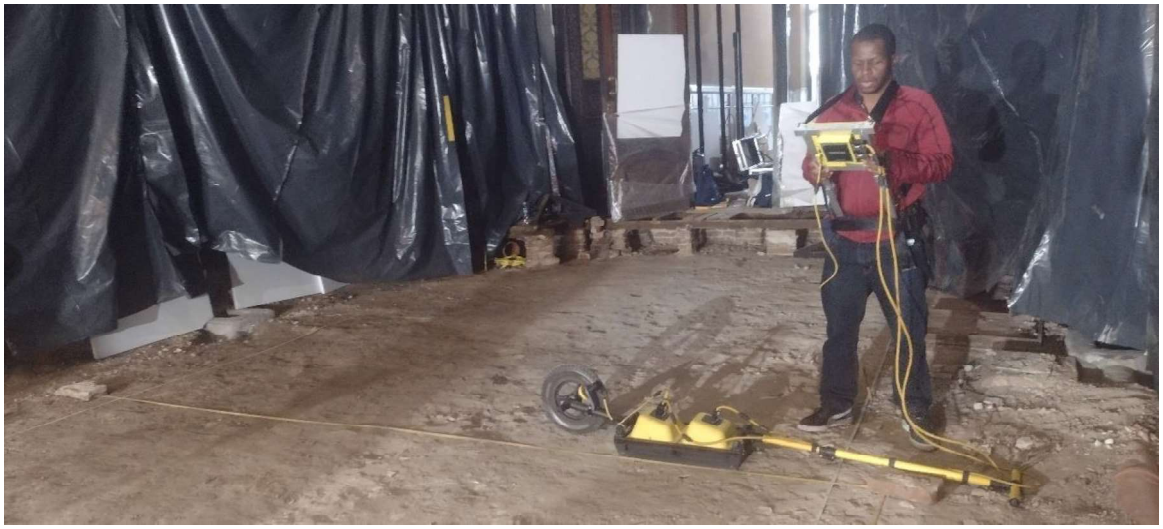


Figura 1. Configurando el equipo para medir en el sitio.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El trabajo de campo se realizó entre los días 17 y 19 de septiembre de 2021. Se prospectó el hall central del Museo, cuyas dimensiones son 6 m x 16 m aproximadamente. En la Fig. 2 se muestra una foto del sitio.

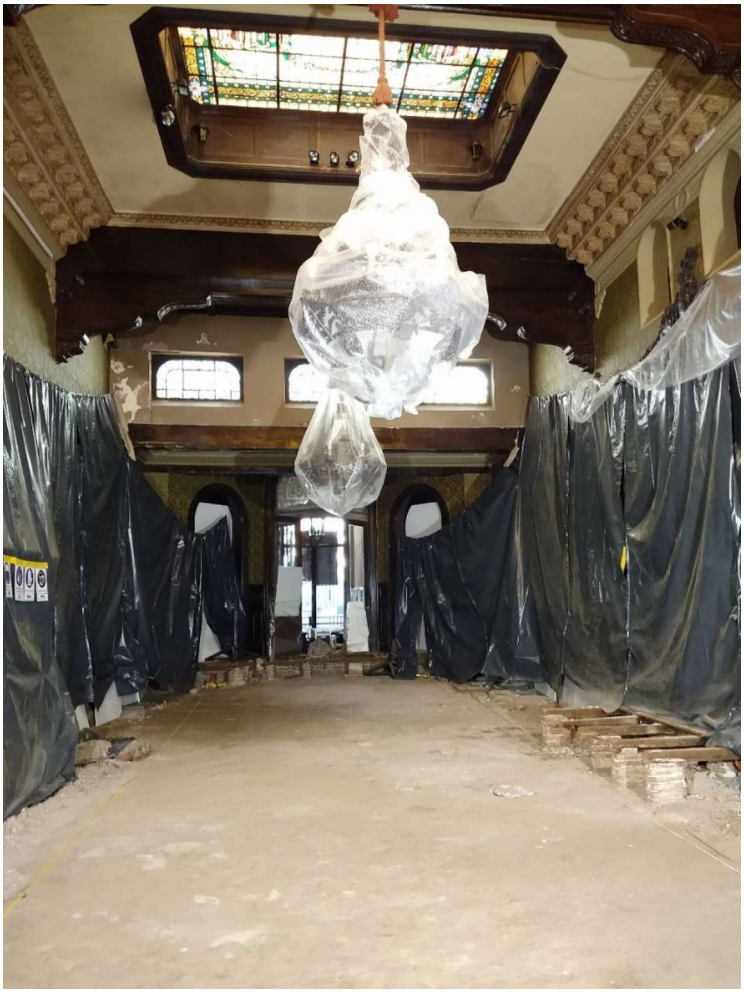


Figura 2. Foto del sitio donde se prospectó con el georradar.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Se pretendía localizar muros y/o estructuras asociadas a un pozo de agua, cuya existencia no estaba asegurada, ni tampoco su ubicación exacta. La superficie del suelo estaba lisa como para poder pasar el equipo sin interferencias, pero la presencia de paredes determinó que la zona a prospectar sea un rectángulo de tamaño menor, 4 m por 11.5 m. Para cubrir esa superficie, se realizaron líneas paralelas entre sí, de 4 m de longitud, separadas cada 5 cm, lo que sumó un total de 231 líneas. En las siguientes fotos se muestran los hallazgos arqueológicos previos que motivaron el presente trabajo de investigación. En la Fig. 3, una excavación de 30 cm de diámetro deja ver un ladrillo a 38 cm de profundidad. En la Fig. 4 se ven ladrillos dispuestos en dirección oblicua con respecto a la pared actual, lo cual indica que pertenecen a una construcción previa. En la Fig. 5 se esquematiza la ubicación de zona prospectada, y su posición relativa a las estructuras halladas. Se utilizó un sistema de coordenadas (x, y) cuyo origen (0, 0) se estableció en el extremo Noreste. Las líneas están orientadas en la dirección del eje x, que es paralelo a la calle Santa Fe.

Figura 3. Izquierda: excavación arqueológica previa a la prospección geofísica. Derecha: detalle con la vista del ladrillo a 38 cm de profundidad.





Figura 4. Ladrillos expuestos durante la excavación, en el lado Este.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

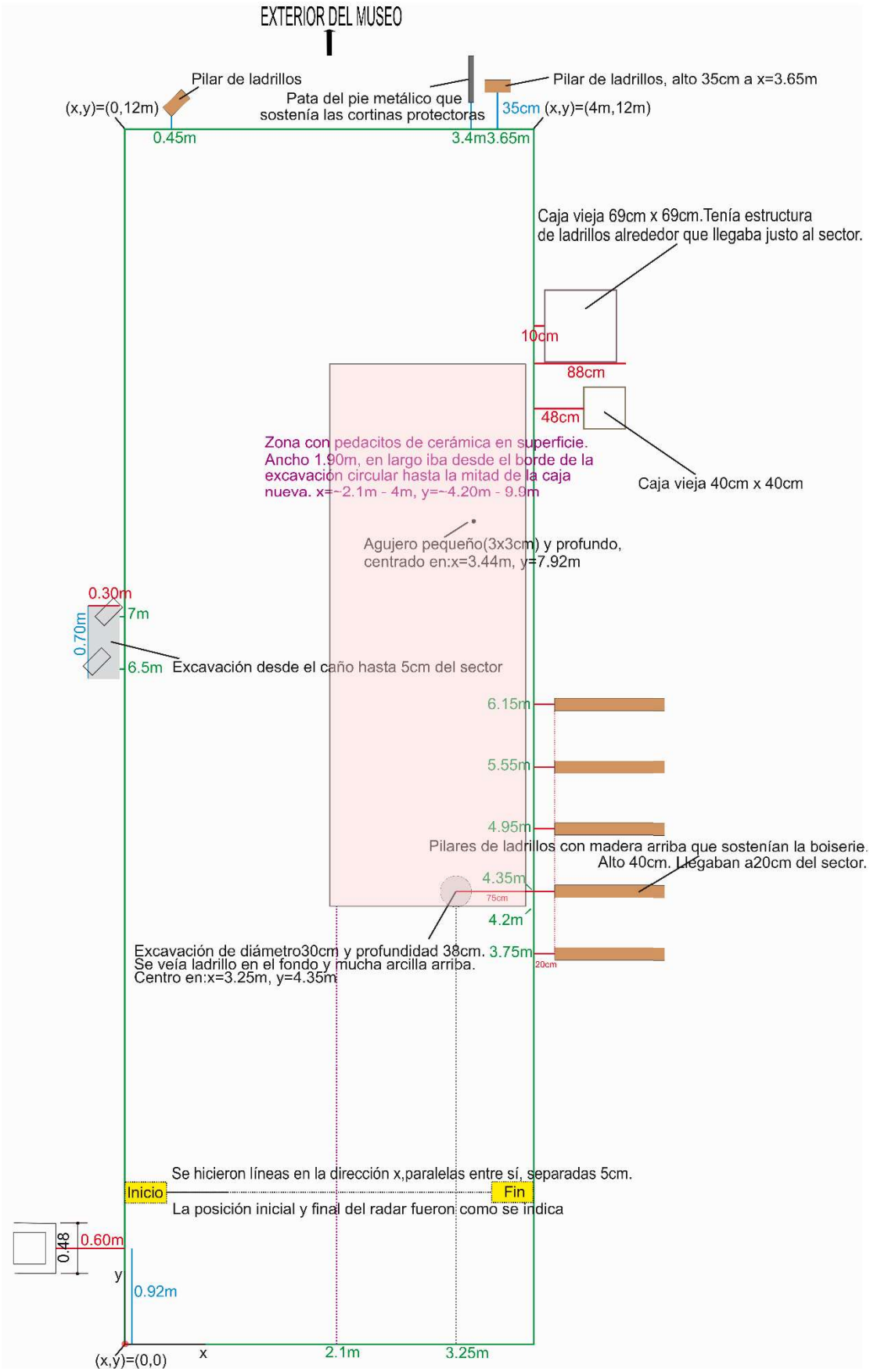


Figura 5. Esquema con la prospección con georradar indicada.

RESULTADOS

En la Fig. 6 se muestra el radargrama obtenido a lo largo de la línea correspondiente a y = 1.25 m, según el sistema de coordenadas indicado en la Fig. 5. Se eligió esta línea a modo de calibración, para poder establecer la velocidad de propagación de las ondas en el sitio. Aproximadamente alrededor de los 3 m en x, se distingue una anomalía muy fuerte, que tiene aproximadamente 40 cm de profundidad (indicada mediante la flecha gris). Esta se corresponde con la excavación indicada en la Fig. 3, de 30 cm de diámetro y 38 cm de profundidad. A partir de esta identificación, se determinó la velocidad de propagación en 0.19 m/ns. En esta misma sección vertical, 6 m a la izquierda de esta excavación, se observan señales con formas irregulares que indican intervención humana (indicadas con las flechas rojas). La central se corresponde con una oquedad, tal como la zona de la excavación, rodeada por dos anomalías en forma de V invertida, que pueden asociarse con ladrillos. Si bien en la figura el extremo superior aparece localizado a los 20 cm, como en esa zona el nivel del suelo se presenta levemente más abajo, el comienzo de los ladrillos estaría a 15 cm del nivel del suelo.

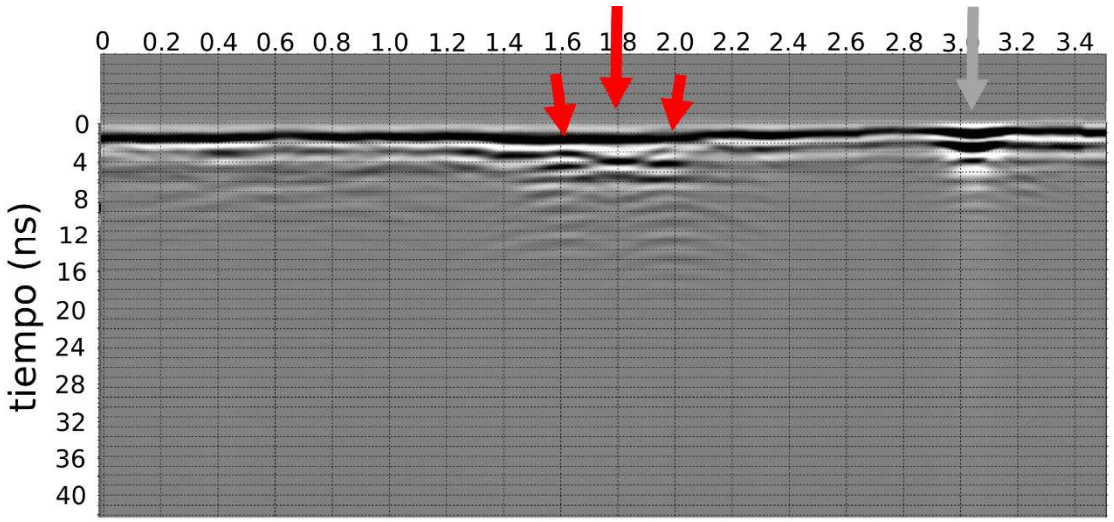


Figura 6. Sección vertical de los datos, para y = 9.5 m.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

En la Fig. 7 a. se muestra un corte a tiempo constante de toda la zona prospectada, que corresponde a una profundidad de 20 cm, aproximadamente. Se llegan a percibir varias zonas anómalas con diferentes intensidades, marcadas en la Fig. 7 b. Las zonas más brillantes de la Fig. 7 a. se corresponden con los "huecos" de la Fig. 7 c. Los mismos fueron marcados en rojo, más o menos intenso. Se puede observar la excavación que utilizamos para calibrar la velocidad de propagación, indicada como un círculo rojo intenso en las coordenadas (3m, 4.2m) aproximadamente. Es de destacar en este trabajo, la complementariedad del trabajo arqueo-geofísico; en base a esta primera excavación, se logró la calibración del radar, y en base a un análisis preliminar de los datos, se pudo detectar en primer lugar la anomalía de tipo circular centrada en (0.6m, 4.9m) aproximadamente, claramente de origen humano. Con esta localización, la comunidad arqueológica comenzó su trabajo en el sitio, y así se dio comienzo a la interacción entre ambos equipos de trabajo.

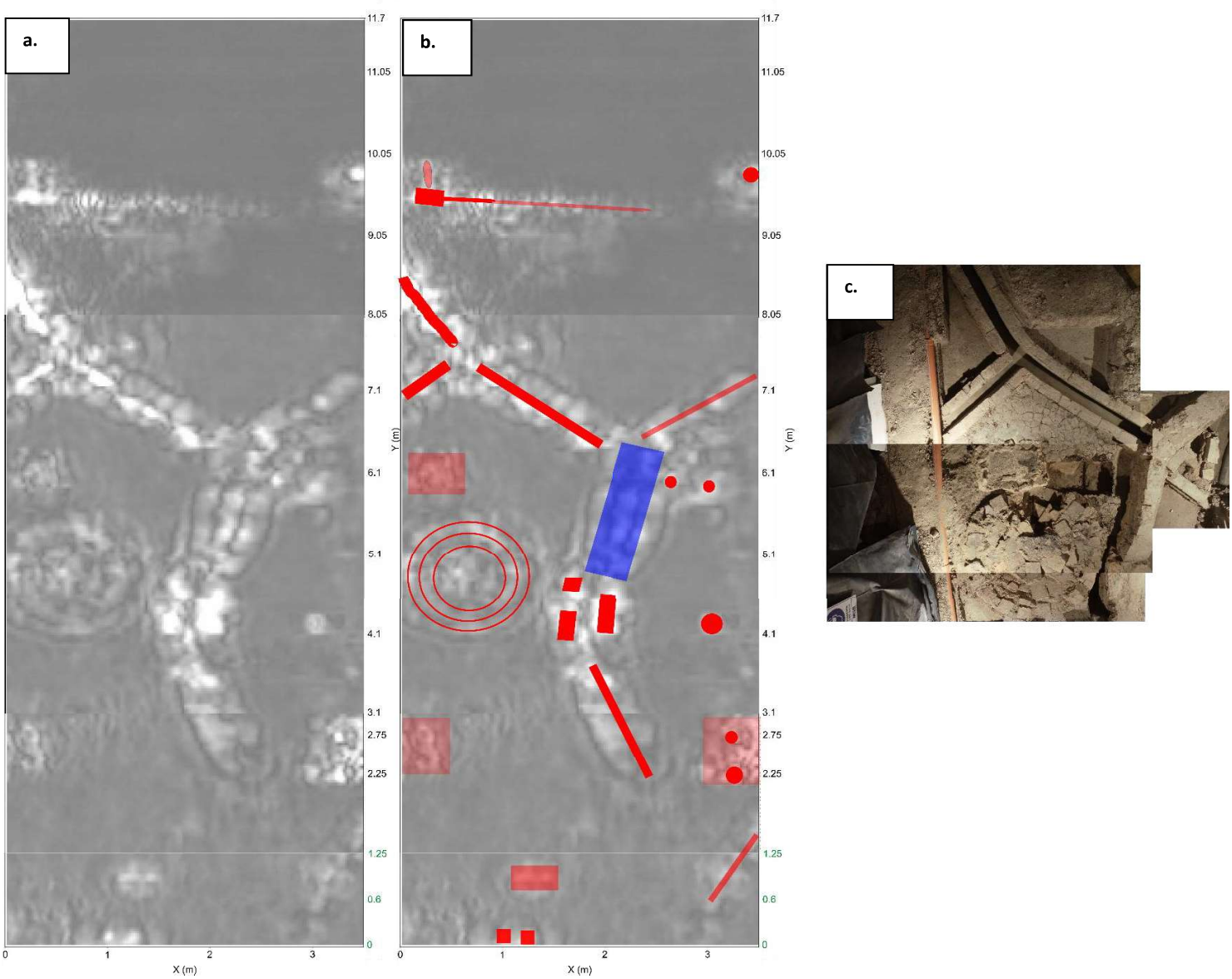


Figura 7. Vista en planta de **a.** los datos a tiempo constante, **b.** datos a tiempo contante con las anomalías marcadas, y **c.** correspondiente foto de planta.

En la Fig. 8 se ve un detalle de lo hallado en la anomalía circular, que se correspondería con un pozo de agua.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Figura 8. Foto del pozo de agua encontrado en la anomalía circular.

Comparando las Figs. 7 a. y b. con la foto mostrada en la Fig. 7 c., se ve que en las 2 primeras figuras, también se divisan claramente las anomalías correspondientes a las canaletas que rodean al pozo. La zona que está marcada en azul presenta un



comportamiento diferente de las demás canaletas; en la Fig. 7 a. se puede ver como un rectángulo inclinado con tres divisiones. Efectivamente, en la foto mostrada en la Fig. 7 c. se ve que en esa zona no hay una canaleta como las demás, sino una pared con pequeños “escalones” a los costados.

Finalmente, en las Figs. 7 a. y b. se observan otras zonas que están fuera de la foto, como por ejemplo la canaleta que continúa por debajo de la zona azul, que se puede distinguir claramente en la foto de la Fig. 9. También hay otra canaleta marcada en la zona inferior de la Fig. 7 b., que se puede identificar en la Fig. 9.



Figura 9. Foto de la excavación del sitio, sacada de Sur a Norte.

CONCLUSIONES

El hecho de que el terreno estuviera liso en superficie y de que el medio tuviera baja humedad y no fuera demasiado arcilloso, permitió la óptima detección de anomalías.

Como se mencionó anteriormente, es de destacar la importancia del trabajo interdisciplinario entre arqueólogos y geofísicos. Sin esta interacción, el trabajo hubiera sido más arduo, tanto para el diseño del plan de excavación, como para la interpretación de anomalías del georradar, ya que es importante tener en cuenta que los métodos geofísicos son indirectos y que, además, determinan contrastes en las propiedades físicas, pero los valores encontrados no definen unívocamente el tipo de material que los produce. Con las excavaciones se pudieron correlacionar adecuadamente las anomalías encontradas.

REFERENCIAS

Xiao, X., Wen, J., Xiao, Z. and Li, W. Detecting and Measuring Internal Anomalies in Tree Trunks Using Radar Data for Layer Identification. *J. Sens*. Volume 2018, Article ID 1430381, 11 pages. (2018).

Grandjean, G., Gourry J.C. and Bitri, A. Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *J. App. Geoph*. Volume 45, Issue 3, 141-156 (2000).

Benedetto, A., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L. and D'Amico, F. GPR Applications Across Engineering and Geosciences Disciplines in Italy: A Review. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*. 2016.

Bonomo, N., Martinelli, P., Osella, A. y de la Vega, M. Prospección con GPR para localizar una cisterna y una galería en un sitio histórico urbano. Geoacta 41(1): 50-64 (2016).

Ratto, N., Bonomo, N. and Osella, A. Arquitectura de la aldea de Palo Blanco (ca. 0–1000 dC), departamento de Tinogasta, Catamarca, Argentina. *Latin American Antiquity* 30(4), pp. 760–779 (2019).

Buscaglia S., Senatore X., Lascano E., Bongiovanni V., de la Vega M., Osella A. Interdisciplinary Perspectives on Spatial Construction in the Eighteenth Century Spanish Colony of Floridablanca (Patagonia). *Historical Archaeology*, 42(4) (2008).

Osella, A. y Lanata, J.L. Arqueo-geofísica: Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado. *Fundación de Historia Natural Félix de Azara y Universidad Maimónides*, ISBN-10: 987-05-1848-8, ISBN-13: 978-987-05-1847-1, (2006).

PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA EN EL FUERTE BARRAGÁN, ENSENADA, PCIA. DE BUENOS AIRES

María Victoria Bongiovanni[a], Vivian Grünhut[a], Patricia Martinelli[b], Fernando Oliva[c]

[a]*Facultad de Ingeniería – Universidad Austral, LIDTUA (CIC)-CONICET, ARGENTINA*
[b]*Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental (GAIA) – Departamento de Física, FCEN, UBA e IFIBA-CONICET, ARGENTINA*
[c]*Centro de Estudios Arqueológicos Regionales, FHYA, Universidad Nacional de Rosario, ARGENTINA*

email: mbongiovanni@austral.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue realizar prospecciones geofísicas en el predio del Fuerte Barragán, Ensenada, Provincia de Buenos Aires. En este lugar comenzó a funcionar el puerto a fines del siglo XVIII, y además se hizo construir la definitiva muralla del fuerte, con la batería y otras dependencias. Si bien el origen de esta fortaleza estuvo centrado en la lucha contra el tráfico ilegal de mercaderías y otros bienes, la importancia histórica de la misma radica en su protagonismo en las invasiones inglesas. En junio de 1806, Santiago de Liniers, a cargo de la batería, resistió el desembarco de las tropas inglesas comandadas por el general William Carr Beresford, en la 1ª invasión inglesa. En junio de 1807, las tropas al mando de John Whitelocke desembarcaron en la Ensenada, en la 2ª invasión inglesa. Actualmente se propone realizar una puesta en valor del predio; para lo cual es necesario, entre otros, un trabajo previo de investigación arqueológica, a fin de preservar posibles restos del sitio original que aún permanezcan in situ en contextos primarios. El objetivo de nuestro trabajo fue estudiar dos zonas; una cercana a la supuesta localización del polvorín, y la otra zona cercana a una cisterna antigua ya excavada. La campaña geofísica se realizó del 5 al 7 de noviembre de 2021, donde se aplicó el método de prospección geofísica geoeléctrica, a fin de obtener tomografías eléctricas del subsuelo. En ambos sectores se detectaron anomalías que podían corresponder a estructuras relevantes. En base a estos resultados se diseñó un plan de excavaciones, las cuales fueron llevadas a cabo durante cuatro períodos consecutivos, entre diciembre de 2021 y julio de 2022. La excelente correlación obtenida entre las hipótesis surgidas de las prospecciones geoeléctricas y lo hallado mediante las excavaciones en el sitio, permitió valorar el trabajo interdisciplinario arqueogeofísico.

Palabras Clave: Geoeléctrica, Fuerte Barragán, Arqueogeofísica.

INTRODUCCIÓN

Objetivos

El objetivo de este trabajo fue realizar prospecciones geofísicas en el predio del Fuerte Barragán, Partido de Ensenada, Provincia de Buenos Aires. Este predio se encuentra ubicado frente a la ensenada de Barragán, a 200 m de la costa sobre Río Santiago y a 18 km de la ciudad de La Plata, entre el Arroyo Doña Flora y el Arroyo del Gato. En este lugar comenzó a funcionar el puerto en el año 1801, y además se hizo construir la definitiva muralla del fuerte, con la batería, dos garitas, y otras dependencias. La importancia histórica de este lugar radica en su protagonismo en las invasiones inglesas; el 24 de junio de 1806, Santiago de Liniers, a cargo de la batería, rechazó el desembarco de las tropas inglesas comandadas por el general William Carr Beresford, en la 1ª invasión inglesa. El 28 de junio de 1807, las tropas al mando de John Whitelocke desembarcaron en la Ensenada durante la 2ª invasión inglesa, (Roberts, Carlos 2006).

Actualmente se propone realizar una puesta en valor del predio; para lo cual es necesario, entre otros, un trabajo previo de investigación arqueológica, a fin de preservar posibles restos del sitio original que aún permanezcan enterrados. Cabe consignar que el Museo Barragán fue declarado Monumento Histórico Nacional en 1942. El objetivo de nuestro trabajo fue estudiar dos zonas en particular, una cercana a la supuesta localización del polvorín, y la otra zona cercana a una cisterna antigua ya excavada. Se aplicó el método de prospección geofísica llamado geoeléctrica, a fin de obtener tomografías eléctricas del subsuelo.

Método Geoeléctrico

Mediante el método geoeléctrico se pueden obtener tomografías 2D o 3D del subsuelo, a partir de mediciones realizadas en superficie. Estas imágenes muestran las variaciones de la resistividad eléctrica del suelo, tanto laterales como en profundidad, lo que permite detectar y caracterizar cuerpos o estructuras cuya resistividad difiera de la del medio circundante. Este método es no invasivo y no destructivo y, por lo tanto, tiene amplias aplicaciones en temas ambientales como, por ejemplo, en detección de estructuras arqueológicas enterradas (Osella et al, 2015; Supriyadi *et al* 2019; Akca et al 2019), caracterización y monitoreo de contaminantes (Coria et al, 2009; Abudeif et al, 2022; Akiang et al, 2023), etc.

Para obtener dichas imágenes se emplea una fuente artificial de corriente. En cada punto de medición (o sondeo), se inyecta en el suelo corriente de intensidad *I* a través de un par de electrodos conectados a esa fuente, y se realizan mediciones de la diferencia de potencial en otros dos electrodos -sensores- cuyas posiciones se eligen convenientemente. Midiendo la intensidad de corriente *I*, la diferencia de potencial y las distancias relativas entre los electrodos, se obtiene la resistividad aparente en ese punto. A partir de los datos de campo (las resistividades aparentes en cada punto), se calcula la distribución de resistividades subsuperficiales. De esta forma, se obtiene información del subsuelo con mediciones realizadas solamente en superficie, de manera no destructiva y no invasiva.

Cada configuración de electrodos posee su propia sensibilidad y resolución según las distancias entre electrodos utilizados y el modo en que se implemente. Según las dimensiones y/o profundidades de los rasgos o estructuras que se desea encontrar y de sus contrastes de resistividad se debe elegir la configuración adecuada y el modo conveniente de implementarla (Osella y Lanata, 2006).

Las resistividades aparentes se grafican en lo que se conoce como una pseudosección. El valor obtenido en una medición dada se grafica en un plano y se lo ubica según la posición del punto de sondeo en la dirección horizontal y a una determinada profundidad en dirección vertical. A partir de la visualización de los datos ya se puede inferir la existencia de anomalías. Sin embargo, para una correcta caracterización, los datos deben ser procesados. Se utilizan para ello métodos de inversión, que consisten en códigos que permiten, a partir de la respuesta que originó la tierra frente a un estímulo (en este caso la inyección de corriente), obtener las características del medio; es decir, la distribución real de resistividades. Este mapa en profundidad de la resistividad eléctrica se denomina

Tomografía Eléctrica.

Se utilizaron dos equipos; un resistivímetro automático multielectrodo comercial Saris 500 marca Scintrex (ver Fig. 1a), y un equipo desarrollado en el GAIA (ver Fig. 1b).

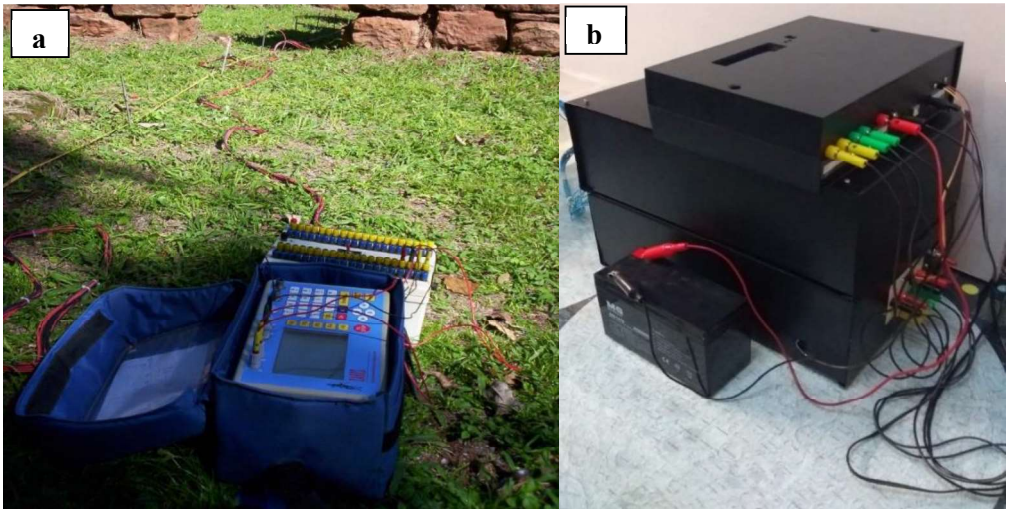


Figura 1. a. Sistema de multielectrodos de adquisición de datos comercial. **b.** Sistema de adquisición de datos en el campo desarrollado en el GAIA.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El trabajo de campo se realizó entre los días 5 y 7 de noviembre de 2021. Se analizaron dos sectores dentro del predio del Fuerte. En la Fig. 2 se muestra una imagen satelital actual del sitio histórico, con la ubicación de los sectores estudiados.

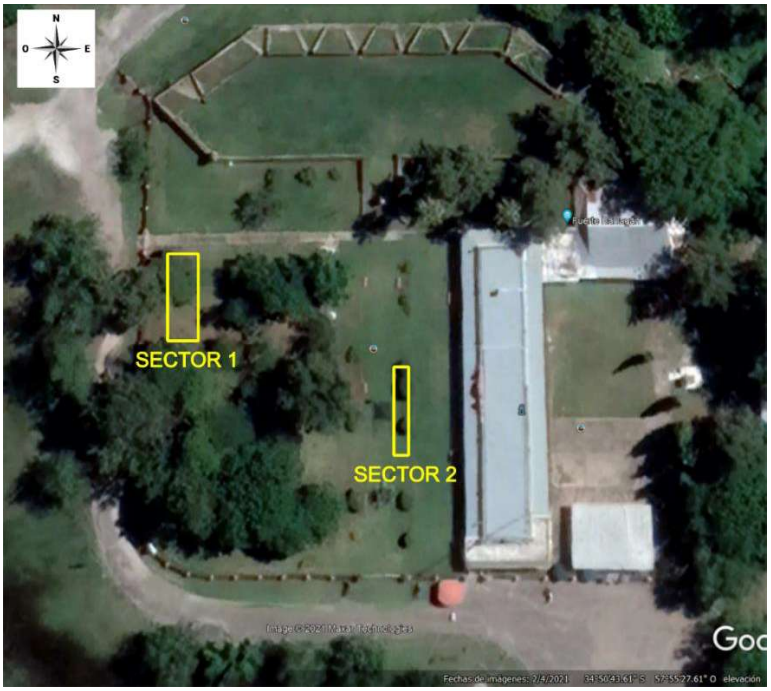


Figura 2. Imagen satelital de la zona en la actualidad, con los dos sectores estudiados indicados en amarillo.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

SECTOR 1

Se pretendía localizar el polvorín del fuerte, cuya ubicación exacta se desconoce, pero se estima podría estar cerca de las murallas del lado oeste. La zona estaba cubierta de pasto y con algunos árboles. Se estudió una zona cercana a una abertura con una puerta estilo tranquera con pilares a ambos lados y a un camino interno que va en la dirección Este-Oeste (ver Fig. 3). En este trabajo, que requería alta resolución espacial y profundidades someras, se eligió la configuración electródica Dipolo-Dipolo. Se realizaron 5 líneas paralelas de 11.5 m de longitud, con electrodos cada 50 cm. En la Fig. 4 se esquematiza la ubicación de las líneas prospectadas. Todas las líneas se emplazaron a lo largo de la dirección Norte-Sur. En la Fig. 5 se muestra una foto de la Línea 1 de geoeléctrica.

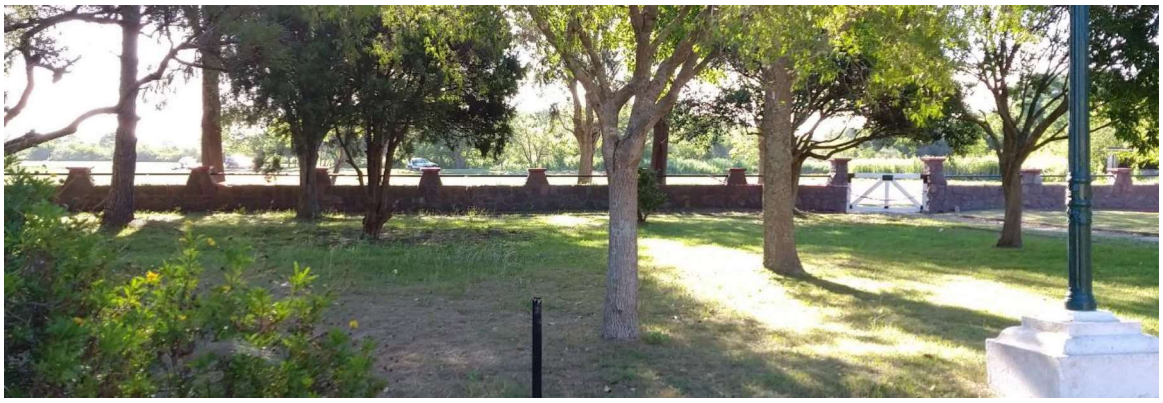


Figura 3. Foto de la ubicación de la abertura con los pilares, punto de referencia para el comienzo de las líneas.

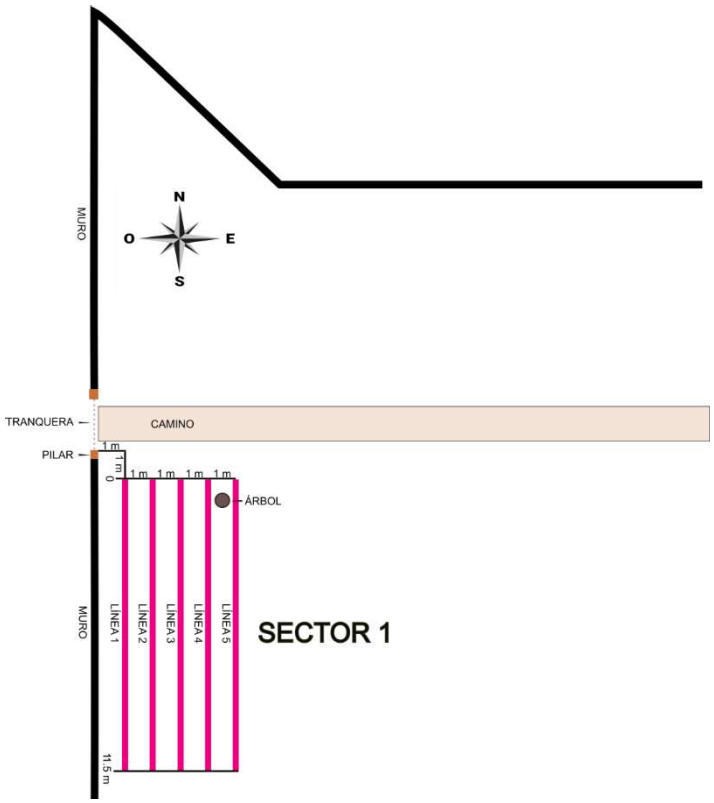


Figura 4. Esquema con la ubicación de las líneas de geoeléctrica indicada.



Figura 5. Tendido de la Línea 1 de geoeléctrica.

Resultados

Los perfiles de resistividad eléctrica del suelo obtenidos en las líneas L1 a L5 se muestran en la Fig. 6. Se han realizado inversiones de los datos de distintas maneras, como para tener mayor certeza de la existencia de las anomalías que se ven. Se observó que hay una cierta variación en los resultados según como se invierta, pero lo que consideramos de interés aparece prácticamente en todas las inversiones. Este hecho justamente es lo que nos da certeza acerca de la existencia de algunas anomalías. Las mismas están marcadas con flechas color magenta en la Fig. 6.

En la L1 se observa una zona conductora (azul) extendida en la zona inferior, a partir de una profundidad media de 50 cm. Esta zona podría corresponderse o bien con la napa freática, o bien con el suelo natural arcilloso. A nivel superficial se observa una capa resistiva desde el comienzo de la línea, que se ve interrumpida a los 7.5 m por una zona conductora que asciende casi a nivel superficial.

La línea L2 presenta un comportamiento similar a la L1.

En la línea L3 se distingue una capa resistiva de 50 cm a lo largo de toda la línea, salvo a los 2.75m, lo que coincide con la posición de un árbol. Es posible que en esta zona, la humedad propia de las raíces contribuya a aumentar la conductividad del suelo a su alrededor. La capa conductora inferior también se observa aproximadamente a partir de los 50 cm de profundidad en toda la línea.

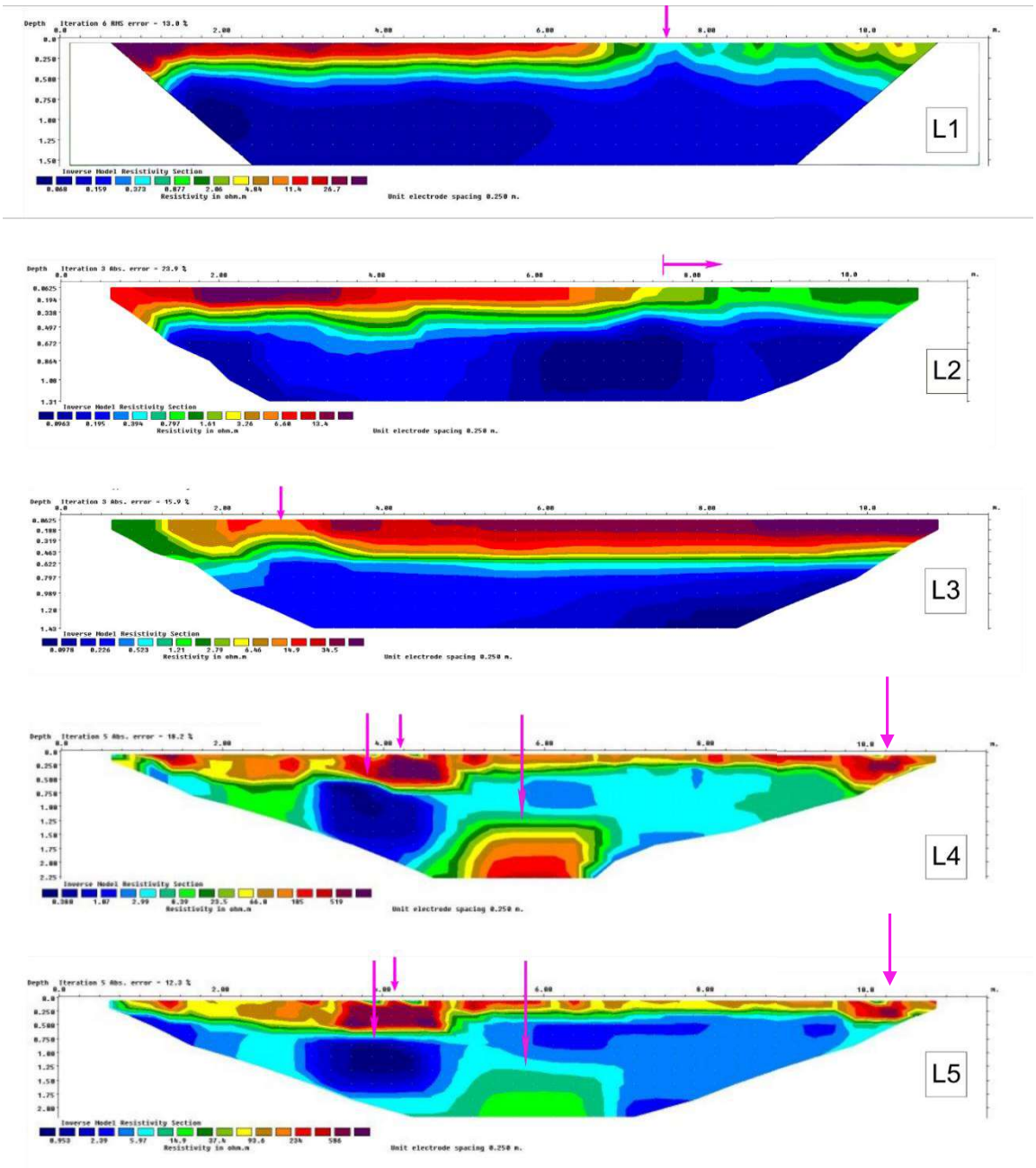


Figura 6. Tomografías eléctricas de las líneas L1 a L5.

En el caso de las líneas L4 y L5, se pudo detectar la presencia de una anomalía conductora que se extiende horizontalmente desde los 3.5 m hasta los 4.5 m, y en profundidad se ve desde los 75 cm hasta los 1.25 m aproximadamente. Asimismo, en ambos perfiles se observan: una anomalía resistiva superficial alrededor de los 4 m, de 75 cm de longitud aproximadamente, que va desde la superficie hasta los 50 cm de profundidad, y otra anomalía resistiva superficial alrededor de los 10m, de 25 – 30 cm de longitud, que va desde la superficie hasta 30 cm de profundidad. En la L3 también se puede observar,

 ISBN: 978-987-1323-89-0

aunque no tan nítidamente, una anomalía superficial alrededor de los 4m. Finalmente, en L4 y L5 se distingue también una anomalía resistiva alrededor de los 6 m, muy profunda (a partir de los 1.75 m), de la cual no se llega a ver su límite inferior.

Producto de estas prospecciones se planificó y se realizaron cuatro períodos de excavación entre diciembre de 2021 y julio de 2022, con el fin contrastar las hipótesis surgidas de las prospecciones geoeléctricas. En la Fig. 7 superior se muestra la excavación realizada en el Sector 1 a lo largo de las líneas L4 y L5. Se registró un contrapiso con mucha cal. En la Fig. 10 inferior se muestra el detalle de la estructura hallada a los 10 m, coincidente con la anomalía detectada con geoeléctrica.



Figura 7. Superior. Excavación realizada en el Sector I, a lo largo de las líneas L4 y L5. **Inferior.** Detalle de la estructura hallada a los 10 m

 ISBN: 978-987-1323-89-0

SECTOR 2

En este sector, cercano al ala oeste del edificio del Museo, se encuentra una excavación expuesta; es una estructura circular de ladrillos que se corresponde con un antiguo pozo de agua. Actualmente esta estructura se encuentra protegida con una tapa que desliza sobre un riel para poder descubrirla en caso de ser necesario. El objetivo de la prospección geofísica fue estudiar la posible presencia de una canaleta en las proximidades del pozo. Se realizaron tres líneas paralelas según se esquematiza en la Fig. 8. La primera, L6, estaba a 70 cm de la tapa, L7 a 1m de L6 y L8 separadas un metro de L7. Todas las líneas fueron de 15.5 m de largo, con electrodos cada 50 cm. El metro 8 de las líneas se corresponde con el medio de la tapa cerrada (ver esquema).

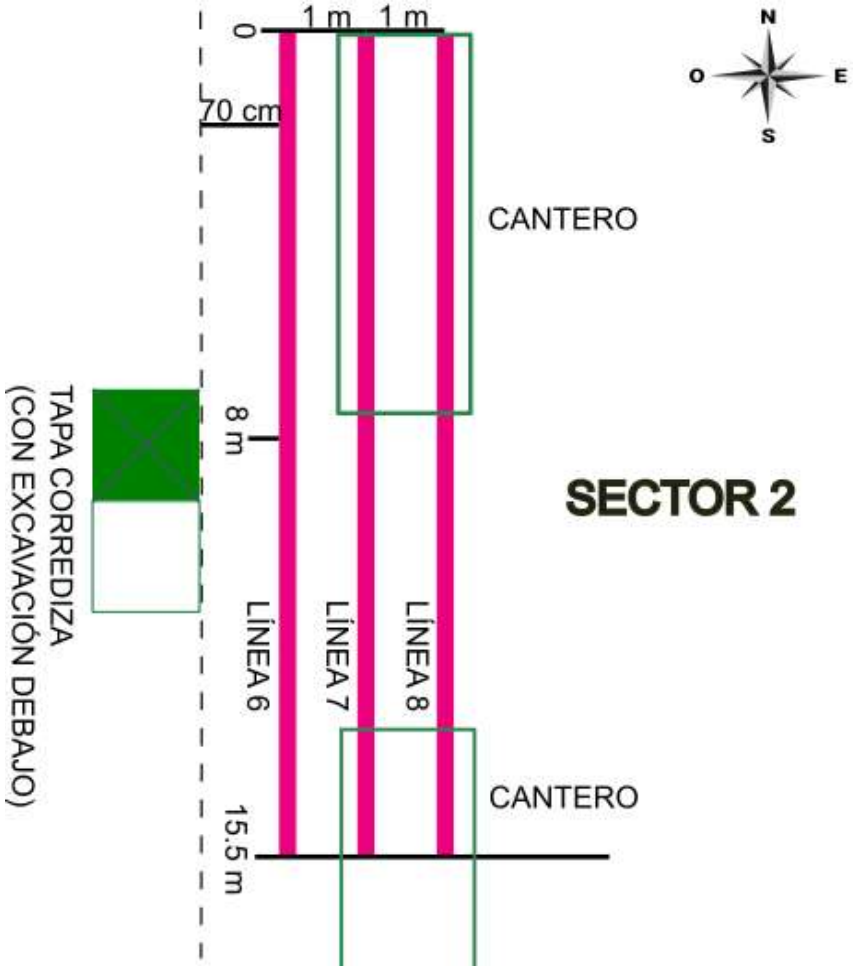


Figura 8. Esquema con la ubicación de las líneas de geoeléctrica indicada.

En la Fig. 9 se muestra una foto con el tendido de la línea L6 de geoeléctrica.

 ISBN: 978-987-1323-89-0



Figura 9. Tendido de la línea L6 de geoeléctrica.

Resultados

Los perfiles de resistividad eléctrica del suelo obtenidos en las líneas L6 a L8 se muestran en la Fig. 10. Al igual que en el Sector 1, se han realizado inversiones de los datos de distintas maneras, como para tener mayor certeza de la existencia de las anomalías que se ven. Como se observó una cierta variación en la ubicación exacta de las anomalías puntuales según como se invierta, consideramos apropiado marcar zonas extensas de interés que aparecen prácticamente en todas las inversiones, y sólo algunas anomalías puntuales. Las mismas están marcadas con color magenta.

En las tres líneas se observa una capa resistiva superior, hasta los 50 cm aproximadamente, donde comienza el suelo natural, de tipo conductor. Analizando más en detalle cada línea, vemos que esas capas se interrumpen en determinados lugares.

En la línea L6 la capa resistiva superior se ve interrumpida desde los 50.8 m hasta los 7.75 m, marcándose especialmente una anomalía conductora puntual a los 7.5 m. Asimismo, a partir de los 10.5 m y hasta el final del perfil se observa una zona de más alta conductividad. Si observamos la capa conductora a partir de los 50 cm a lo largo de toda la línea, aparece una interrupción de la misma de los 10.25 m a los 11.75 m.

En la línea L7 se observan dos zonas de menor resistividad en la capa resistiva superior; una de 6.5 a 8.25 m y la otra, más conductora que la otra, de 11.25 a 13.5 m.

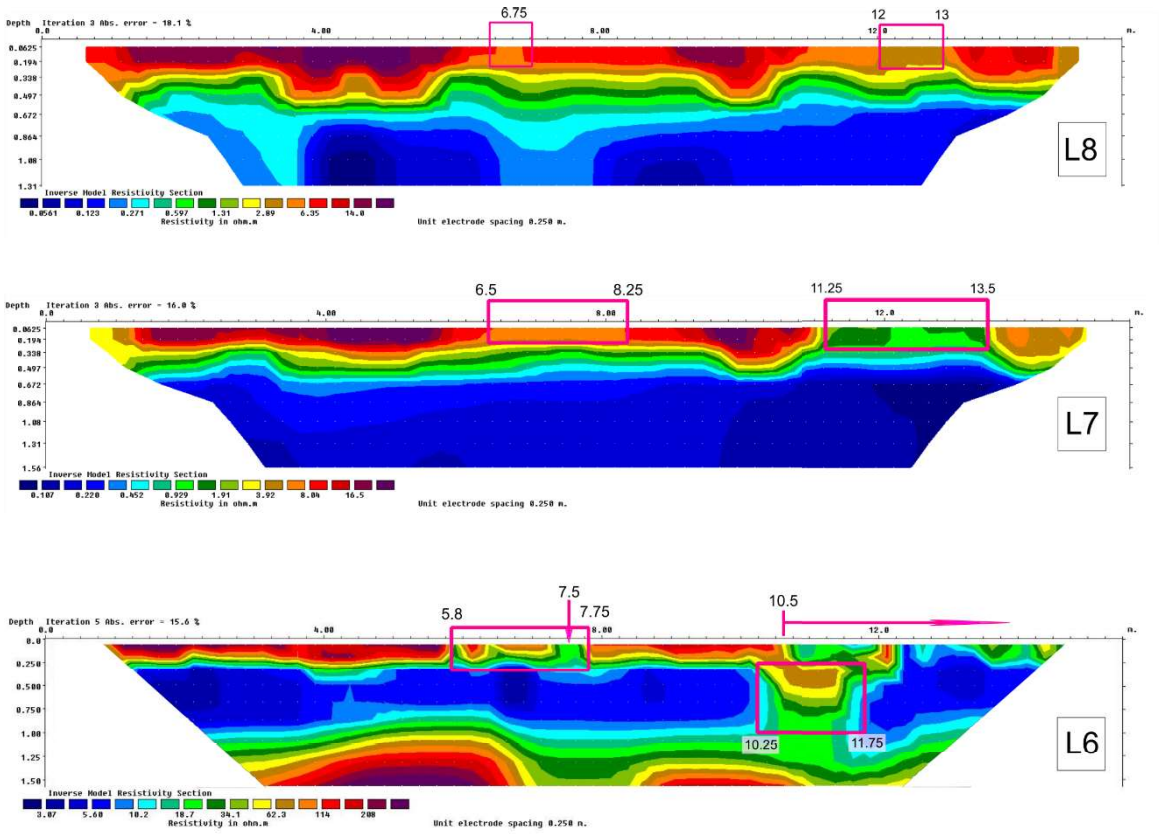


Figura 10. Tomografías eléctricas de las líneas L6 a L8.



Figura 11. Vista superior de todo el Sector 2 excavado.

En la línea L8 también se observan dos zonas interrumpidas en la capa resistiva superior, la primera centrada en 6.75 m, y la otra de 12 a 13 m.

En la Fig. 11 se muestra una vista superior de todo el Sector 2 excavado. Se registró un patio que rodea al pozo localizado en el centro de esta excavación, con una superficie de 58 m^2 expuesta al presente. El piso hallado en la zona señalada, se corresponde con la anomalía marcada en la tomografía geoeléctrica de la L6, desde los 10.25 a los 11.75 m.

CONCLUSIONES

En ambos sectores se han detectado anomalías, a pesar de que el terreno posee un suelo conductor a poca profundidad, lo cual dificulta la penetración de la corriente eléctrica. Este hecho hizo muy difícil la detección de anomalías profundas salvo excepciones, como las marcadas en las líneas L4, L5 y L6. La localización de las anomalías posibilitó un plan de excavación, el cual fue completado. En el Sector 1 se ha podido determinar la presencia de un contrapiso construido con mucha cal y con rodados costeros. El pozo del Sector 2 también se encontraba recubierto con abundante cal. Tales coincidencias podrían ser elementos indicadores de la funcionalidad en determinado momento de ocupación del sitio. Pueden ser interpretadas como mera técnica constructiva o tal vez como medidas de tipo aséptica, en vinculación con las actividades de combustión o con determinado tipo de situaciones sanitarias. La ampliación de Unidades de Excavación abordadas en otros momentos, sumado a la excavación de nuevas Unidades posibilitó en el Sector 2 tener un área amplia abierta de unos 58 metros cuadrados, lo cual permitió una interpretación fehaciente y, por lo tanto, una puesta en valor del Fuerte. La correlación existente entre las anomalías detectadas y lo hallado mediante la excavación, permitieron además valorar el trabajo interdisciplinario arqueogeofísico.

REFERENCIAS

Abudeif, A.M.; Abdel Aal, G.Z.; Masoud, A.M.; Mohammed, M.A. Detection of Groundwater Pathways to Monitor Their Level Rise in Osirion at Abydos Archaeological Site for Reducing Deterioration Hazards, Sohag, Egypt Using Electrical Resistivity Tomography Technique. *Appl. Sci*., 12, 10417 (2022).

Akca, İ., Balkaya, Ç., Pülz, A., Alanyalı, H. and Kaya, M. Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey), *Journal of Applied Geophysics*, Volume 163, Pages 22-30 (2019).

Coria, D., Bongiovanni, V., Bonomo, N., de la Vega, M, Garea, M.T. and Osella, A. Hydrocarbon contaminated soil: geophysical-chemical methods for designing remediation and monitoring strategies. *Near Surface Geophysics*, Vol 7, No. 3, pp. 227-236 (2009).

Roberts, C. Las Invasiones Inglesas del Río de La Plata y la influencia en la independencia y organización de las Provincias del Río de la Plata- Capítulo II - *Antecedentes lejanos de las invasiones inglesas* - pág. 39, Emecé (2006).

Osella, A. y Lanata, J.L. Arqueo-geofísica: Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado. *Fundación de Historia Natural Félix de Azara y Universidad Maimónides*, ISBN-10: 987-05-1848-8, ISBN-13: 978-987-05-1847-1, (2006).

Osella, A., Martinelli, P., Grünhut, V., de la Vega, M., Bonomo, N. y Weissel, M. Electrical imaging for localizing historical tunnels at an urban environment, *J. Geophys. Eng*. 12 674–685 (2015).

ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA DE UNA CUENCA SERRANA BONAERENSE ANTE DIFERENTES EVENTOS PLUVIALES Y CAMBIO DE USO DEL SUELO

Lucia Bottan[a], M. Isabel Delgado[a,b] y Fernanda J. Gaspari[a,c]

[a]*Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA.*
[b]*División Ficología, Museo de La Plata, FCNyM-UNLP. CONICET. ARGENTINA.*
[c]*Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena. CEIDE. FCAyF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA.*

e-mail: lucia.bottan@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

En la zona del sistema serrano bonaerense de Ventania, Argentina, es recurrente la existencia de importantes excesos hídricos, seguidos por déficits de larga duración que han sido acentuados por la pérdida de vegetación natural y el avance de actividades agrícola-ganaderas y de la urbanización. El objetivo del presente trabajo fue analizar la respuesta hidrológica en la Cuenca Alta del río Sauce Chico (CARSCH), a partir de la simulación lluvia-escorrentía, según diferentes eventos pluviales y ante el cambio espacio-temporal del uso del suelo. Para la modelización hidrológica se utilizó el programa HEC-HMS, para lo cual se realizó una caracterización morfométrica como herramienta de base y se aplicó el modelo de Número de Curva (NC) para un evento pluvial modal y otro torrencial con fines de comparación de la respuesta de la cuenca. La zonificación geoespacial y temporal de la cobertura vegetal se definió a través de la interpretación de imágenes satelitales y geoprocesamiento digital, para tres escenarios de uso del suelo (2020-2022-2023). Al analizar los resultados se determinó que el mayor volumen escurrido y caudales máximos en tormentas extremas, se generaron en áreas serranas; mientras que ante eventos modales, los máximos se registraron en zonas de lomadas. La modelación hidrológica proporcionó información de la interacción entre el uso del suelo y el efecto de la erosividad pluvial que permite pronosticar la influencia sobre la escorrentía superficial, según el uso del suelo Se demostró que el escurrimiento frente a una tormenta modal es más sensible ante el cambio de uso del suelo de los escenarios planteados. Mientras que, ante un evento extremo, la morfometría de la cuenca es la que determina la generación de caudales en mayor medida, expresando menor sensibilidad frente al cambio de uso del suelo en los escenarios planteados.

Palabras Clave: Simulación hidrológica, HEC-HMS, Sierras bonaerenses.

INTRODUCCIÓN

La degradación de una cuenca hidrográfica consiste en la pérdida de su valor en el tiempo, que incluye el potencial productivo de la tierra y el agua, provocando cambios pronunciados del comportamiento hidrológico del sistema fluvial y que se traduce en una peor calidad, cantidad y regularidad temporal del caudal hídrico (Gaspari et al, 2021). Este proceso es consecuencia de efectos recíprocos de las características geográficas, el clima y el uso inadecuado del suelo, produciendo una aceleración de la degradación ecológica, y acentuando problemáticas económicas y sociales (Torrero, 2009).

Varios autores como Albouy & Bonorino (1997), Gaspari (2007), Torrero (2009), FUNS (2011), Guzman (2021) señalan que en el sistema serrano de Ventania, al sudoeste de la

provincia de Buenos Aires, es recurrente la existencia de importantes excesos hídricos, seguidos por déficits de larga duración. Estas anomalías ocurren debido a una distribución espacial y temporal del clima que oscila cada año y se suma la pérdida de vegetación natural, por el avance de actividades de origen antrópico, como agricultura y ganadería, muchas veces de una forma no sostenible, que contribuyen a la aceleración de los procesos de erosión hídrica y eólica en el área, e intensificación de los efectos de la sequía e inundación (Guzman, 2021).

Este sistema montañoso da origen a diferentes cuencas hidrográficas que determinan sustancialmente la dinámica hídrica de la zona (Navarro & Cano, 2017). La realización de este trabajo se basó en el estudio del tramo superior de la Cuenca del Rio Sauce Chico: la Cuenca alta del Rio Sauce Chico (CARSCH). El área de estudio presenta un riesgo de erosión elevado donde se encuentra la roca aflorante en cantidades abundantes y la pendiente es pronunciada (Gaspari et al, 2021; Michalijos & Zapperi, 2015), las lluvias que son intensas y de corta duración, generan escorrentías que pueden formar grandes avenidas, llegando a generar incluso inundaciones en la zona media de la Cuenca (Guzman, 2021).

Aquí radica la importancia del estudio de la dinámica hídrica de la misma y cómo la afecta los cambios en el uso de suelo y la modificación del paisaje, de esta forma se es posible identificar posibles manejos de uso del suelo que puedan ayudar a disminuir los efectos degradativos del suelo, y al mismo tiempo, mejorar la predicción del escurrimiento. El objetivo de este trabajo fue analizar la respuesta hidrológica en la CARSCH (Fig. 1) a partir de la simulación lluvia-escorrentía para la valoración de la erosividad de precipitaciones modal, y torrencial y su variación ante el cambio de uso de suelo. De esta forma, poder determinar si el uso de prácticas conservacionistas de los suelos disminuyen volumen de las escorrentías frente a precipitaciones modal, y torrencial que pueden ocurrir en la cuenca.

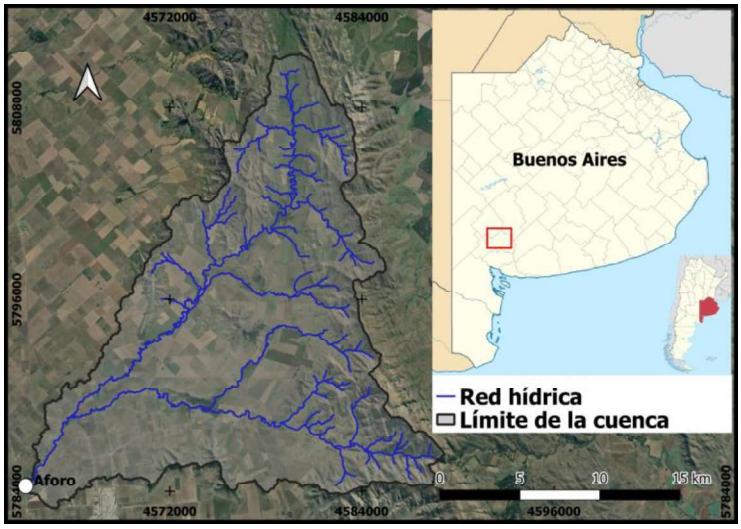


Figura 1. Ubicación espacial de la CARSCH

La CARSCH se encuentra ubicada en la región pampeana en el suroeste de la Provincia de Buenos Aires, comprendida entre los partidos de Saavedra, Coronel Suárez y, en mayor superficie, Tornquist. La cuenca da origen al Río Sauce Chico que desemboca en el estuario de Bahía Blanca y provee el agua de riego del cinturón hortícola de Bahía Blanca (Cristiano & Quartucci, 2015). Dentro del área comprendida por la Cuenca, se encuentran las localidades de Villa Serrana La Gruta y San Andrés de la Sierra,

pertenecientes al partido de Tornquist y cerca del punto de aforo, ya por fuera de los límites de la cuenca de haya la localidad de Tornquist.

La vegetación nativa está representada por la estepa graminosa que cubren las Sierras Australes con presencia de especies endémicas (Frangi & Bottino, 1995). Esta vegetación originaria ha sido cambiada o alterada casi en su totalidad en las áreas pedemontanas (Long et al, 2004) debido principalmente a las actividades agrícolo-ganaderas, con cultivos hasta los 700 msnm y ganadería en toda el área (Picardi & Giacchero, 2015). A esto se suma la actividad turística y la presencia de plantaciones forestales de exóticas con fines paisajísticos y para cortinas y montes de reparo con carácter invasor han avanzado grandes extensiones montañosas (Zalba & Villamil, 2002; Villalobos, 2009).

El clima es templado y subhúmedo seco según la metodología de Thornwhite con una heterogeneidad marcada por inviernos húmedos y veranos secos (Torrero, 2009, De Antueno et al, 2020). Las temperaturas medias oscilan en torno a los 14 °C siendo algo menores en las zonas de mayor elevación (Perez & Frangi, 1995). Las precipitaciones, una tendencia decreciente en dirección NE-SW (Frangi & Bottino, 1995), con precipitaciones que rondan en los valores medios anuales entre 762 a 875 mm registrados (Periodo 1988 – 2017) (Guzman, 2021).

Los suelos más representativos son del orden Molisoles. Entre los cuales se encuentran asociaciones de: Haplustol típico, en el fondo del valle; Haplustol éntico y Haplustol lítico en los interfluvios, desarrollados sobre material loéssico que cubre totalmente las laderas de las sierras, y este a su vez se ubica sobre una costra calcárea (tosca) que oscila los 100 cm de espesor, según los diferentes accidentes que presente su topografía se observa roca aflorante; Argiudol típico en lomas, pendientes y planicies, de un desarrollo completo y profundo (140 cm), poco representado en la cuenca (FUNS, 2011; Gaspari, 2007; De Antueno et al, 2020).

METODOLOGÍA

Se realizó una modelación hidrológica a partir de la caracterización de la CARSCH y sus respectivas subcuencas a nivel morfométrico utilizando el software QGIS 3.4 donde se determinaron parámetros de forma y relieves necesarios como insumos para la modelización posterior.

Se utilizó el programa de uso libre acceso gratuito del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU: Sistema de Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS) para la modelización hidrológica, el cual presenta una interfaz gráfica que permite introducir la información necesaria para la simulación lluvia-escorrentía, manejar los componentes de análisis hidrológico y obtener respuestas en formato de gráfico y/o tablas.

Fueron necesarios parámetros de entrada para cada uno de los cauces que son conectores hidráulicos entre subcuencas, el largo total del tramo (expresada en m), la pendiente expresada (en m/m), y los números de Manning del margen derecho, izquierdo y lecho, y una sección transversal del cauce (x; y). Para ello se utilizó el método Muskignum- Cunge Eight Point, el cual define la geometría del canal utilizando ocho puntos de una sección transversal, para la especificación apropiada del radio hidráulico. Estos puntos se toman como cota sobre el nivel del mar (msnm).

La modelización se realizó para dos tormentas obtenidas de la lectura de fajas pluviográficas, una extrema, de 81,2 mm acumulados que se desarrolló en el año 1986 (Servicio Meteorológico Nacional de Tornquist) y una modal, de 26,5 mm acumulados

para el año 1990 (la Cooperativa Rural), ambas con una duración de 480 minutos, tomada cada 30 minutos (Fig. 2).

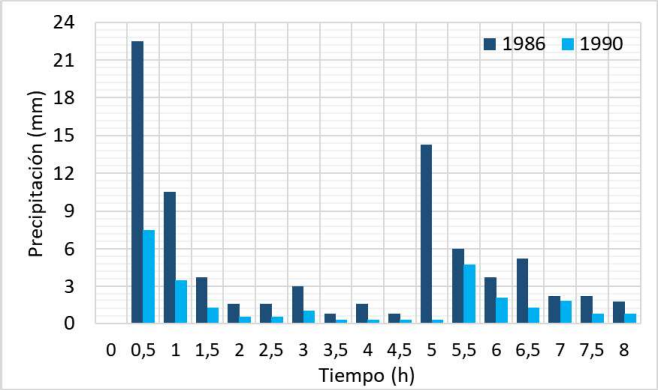


Figura 2. Precipitación medida en mm para un intervalo de 30 minutos, en dos tormentas, una modal y otra torrencial.

Se determinó trabajar el modelo de pérdidas con el método del número de curva (NC) desarrollado por el SCS (1972) para pequeñas cuencas hidrográficas agrícolas, forestales y urbanas. Se basa en estimar de manera directa el escurrimiento superficial de una lluvia aislada para un determinado complejo suelo-vegetación (Gaspari et al, 2015), en función del volumen y profundidad de la lámina que se haya generado (Wang et al, 2005 Rodríguez Vagaría et al, 2014; Gaspari, 2014). El método de NC utiliza una ecuación para cuantificar el escurrimiento superficial (Pe) que se expresa como el cociente entre (P –Ia)2y (P –Ia+ S), donde P es la precipitación, Ia es la abstracción inicial, S es el máximo potencial de retención de la cuenca ante un evento de tormenta y se determina por el cociente entre (25.400 –254 x NC). El NC, representa la combinación del grupo hidrológico de suelo, las clases de coberturas y usos del suelo y la condición de humedad antecedente del suelo (Gaspari et al, 2015).

Para la obtención del NC se inició con la definición y zonificación de los grupos hidrológicos (GH) a nivel de cada subcuenca hidrográfica, el cual expresa la condición hidrológica del suelo según características texturales edáficas (SCS, 1964). A partir de la clase textural de los suelos según la clasificación de USDA (United States Departament of Agriculture, 1964; Rodríguez Vagaría et al, 2014) de la cartografía de suelos de INTA 1:50.000 (INTA, 2018), se establecieron los grupos hidrológicos (GH) en el área en estudio. Posteriormente, por medio del procesamiento e interpretación de los mapas de suelos, se generó el mapa de GH.

La zonificación de la cobertura vegetal se definió para tres escenarios de uso de suelo. El primer (1) escenario utilizado se planteó a partir del mapa de uso de suelo elaborado por Guzmán (2020), que data del año 2020 y denota una desactualización del uso con respecto al presente. El segundo (2) se plantea a partir de la actualización del uso de suelo al presente y con mayor diferenciación entre algunos usos particulares, y un tercer (3) escenario futuro a corto plazo posible (2023) para visualizar el impacto de las prácticas conservacionistas. Se desarrollaron a través de un geoprocesamiento digital, a partir de la interpretación de imágenes satelitales del Google Earth, del año 2022. A partir de la definición del GH, y conociendo el tipo y distribución de la cobertura vegetal y/o el uso del suelo presente en cada subcuenca, para una condición de humedad antecedente media (II), aplicando un procesamiento geoespacial con SIG, se realizó una tabulación cruzada de la cartografía y con un Modelo Algebraico Cartográfico (Harbor, 2007; Gaspari et al, 2016) se zonificó el NC, cuyo valor se estableció a partir de tablas.

Una vez obtenidos todos los insumos necesarios, se realizó una simulación para los dos escenarios de uso de suelo planteados y para ambas tormentas, con un total de cuatro simulaciones.

RESULTADOS

En la Fig. 3 se presenta un esquema de los perfiles transversales de los cauces indicando la posición de cada uno de ellos y la gráfica que genera la representación de las cotas a través de los perfiles.

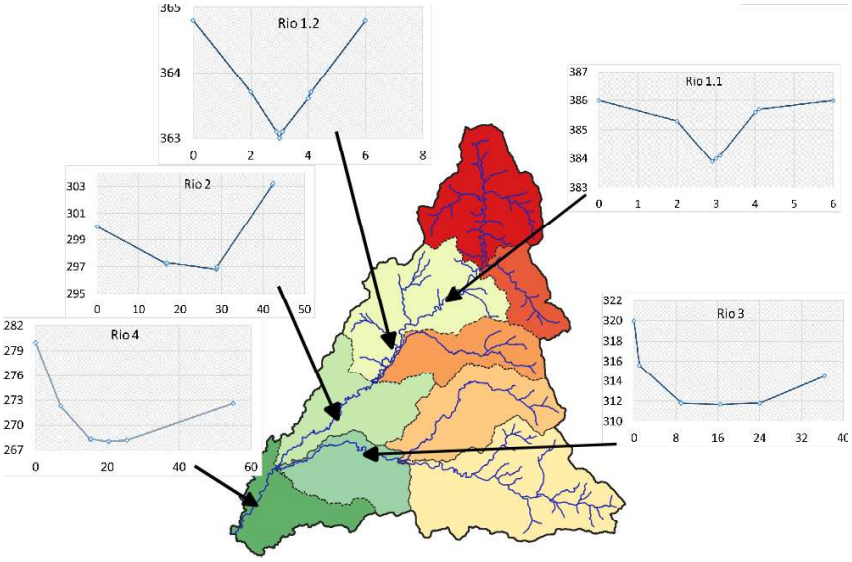


Figura 3. Perfiles de los cauces para el método Muskignum- Cunge Eight Point.

Los resultados de la interpretación de las cartas de suelo provistas por el visor GeoINTA para la cuenca se observan en la figura 4 donde se especifica el grupo hidrológico.

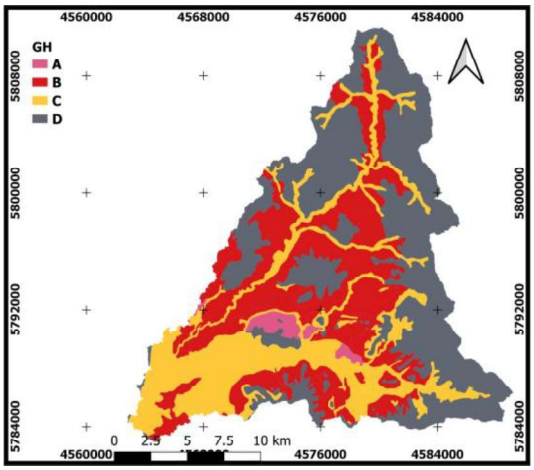


Figura 4. Mapa de Grupo Hidrológico de la CARCSH

Los tipos de uso de suelo para el escenario 1 (Fig. 5) que se identificaron fueron principalmente agricultura, en segundo lugar, pastizal natural con roca en las zonas de mayor elevación, pastizales serranos destinados al pastoreo de ganado, áreas forestales para cortinas y montes de reparo, vegetación ribereña a los márgenes de los ríos y un área

semiurbana representada por las localidades de San Andrés de las Sierras y Villa Serrana La Gruta.

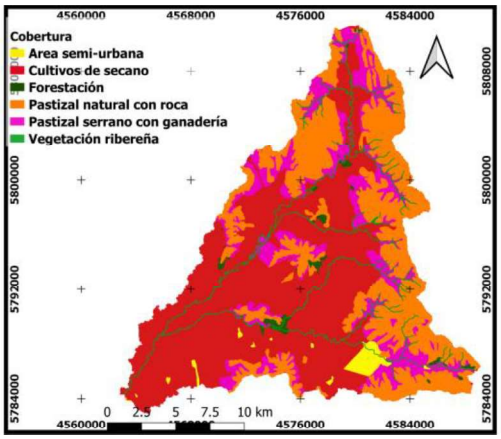


Figura 5. Mapa de Uso de Suelo escenario 1

Para los escenarios 2 y 3 se incorporaron nuevas áreas de vegetación y uso de suelo. Se incorporó la diferenciación en la zona agrícola en cultivos de secano, cultivos bajo riego y cultivos en curva de nivel para el escenario 2 y para el escenario 3 se cambió el área de cultivos en curva de nivel por pastizal en curvas de nivel. Esta decisión de ver la respuesta de la cuenca para estos dos escenarios debido a que la actividad en la cuenca es agrícola-ganadera por lo que los lotes pueden variar de cultivos a pasturas para el ganado y cuál de los dos es el más favorecedor para este tipo de cuenca, aunque el escenario actual de cobertura corresponde más fielmente al escenario 2. Los usos están detallados en la Fig.6.

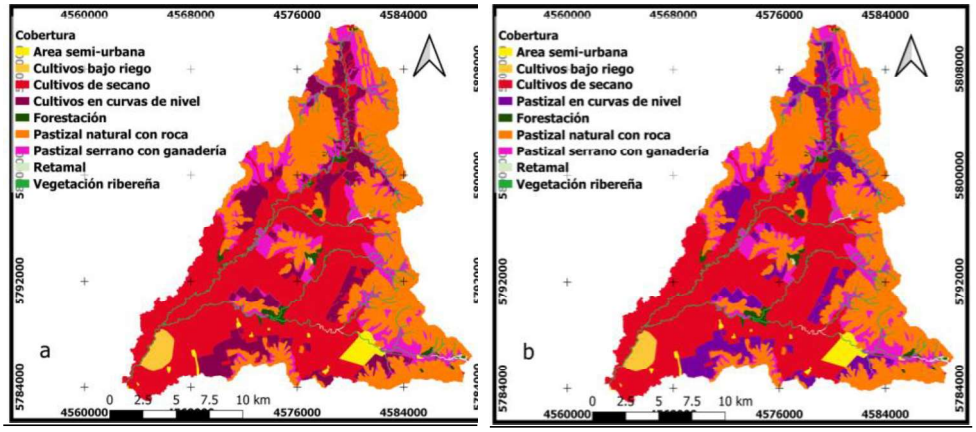


Figura 6. Mapas de uso de suelos para los escenarios 2 (a) y 3 (b)

En la Fig. 7 se especifica el área que le corresponde a cada uso de suelo en km^2 para todos los escenarios (1,2 y 3).

 ISBN: 978-987-1323-89-0



Figura 7. Representación de la ocupación de las diferentes coberturas y usos de suelo. Los valores están expresados en unidad de superficie (Km^2)

La distribución del NC para el escenario 1, 2 y 3 están representados en las Fig. 8, en rangos de 10 unidades.

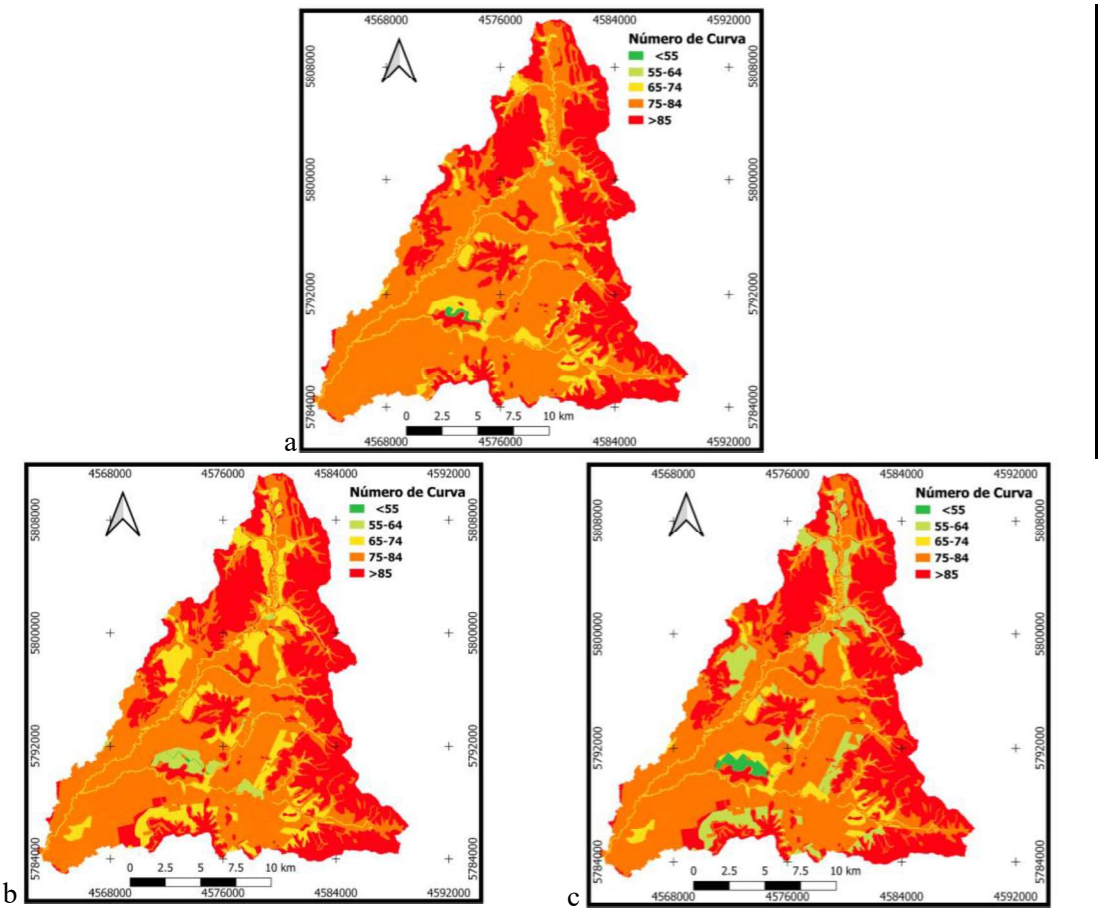


Figura 8. Mapa de Número de Curva (NC) para el escenario 1 (a), 2 (b) y 3(c)

Los datos morfométricos, los perfiles de la Fig. 3 y los NC ponderados correspondientes por subcuenca, se integraron para la modelización en la CARSCH con el HEC-HMS, para los tres escenarios planteados. El esquema de la distribución de las unidades hidrológicas para la secuencia de la modelización hidrológica se presenta en la Fig. 9. Los resultados alcanzados de la modelación del escurrimiento superficial para los tres escenarios proporcionan información sobre la dinámica hídrica superficial como consecuencia de los cambios espacio-temporales de uso del suelo en la CARSCH.

 ISBN: 978-987-1323-89-0



Figura 9. Esquema de la modelación de las unidades hidrológicas de la CARSCH para HEC-HMS 4.2.1

En las Figs. 10, 11 y 12 se presentan los resultados obtenidos para las simulaciones lluvia-escorrentía de los tres escenarios para la lluvia modal y la lluvia torrencial. La figura 10 presenta los valores de caudales pico para cada subcuenca. El caudal pico del punto de aforo para la tormenta modal en los escenarios 1, 2 y 3 fueron de 54,8m3/s, 51,9 m3/s y 41,7m3/s respectivamente. El caudal pico del punto de aforo para la tormenta extrema en los escenarios 1, 2 y 3 fueron de 666,2 m3/s, 655,7m3/s y 623,6m3/s respectivamente.

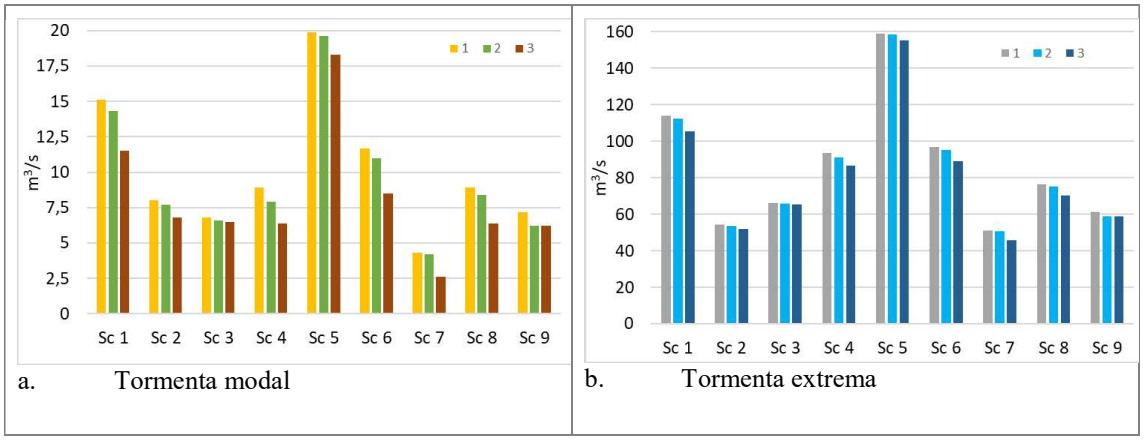
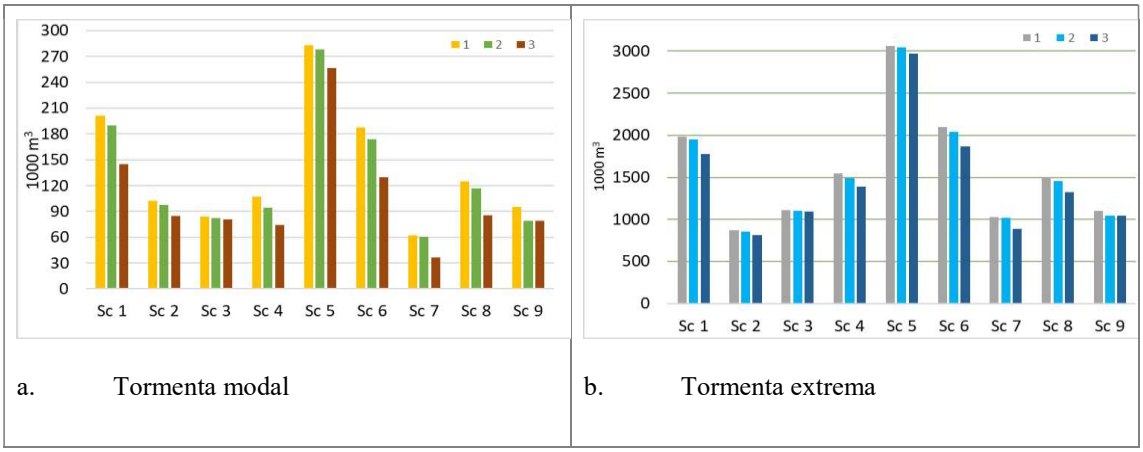


Figura 10. Caudal pico para cada subcuenca (Sc) en los escenarios 1,2 y 3 para una tormenta modal (a) y una tormenta extrema (b).

El volumen de escorrentía obtenido por la simulación para cada escenario se especifica diferenciada por subcuenca en la figura 11. En la tormenta modal, en el punto de aforo se obtuvieron los valores de 1.253.200 m3, 1.179.000 m3 y 980.300 m3 y en la tormenta extrema, se obtuvieron los valores de 14.315.600m3, 14.032.600m3 y 13.210.000m3 para los escenarios 1, 2 y 3 respectivamente.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

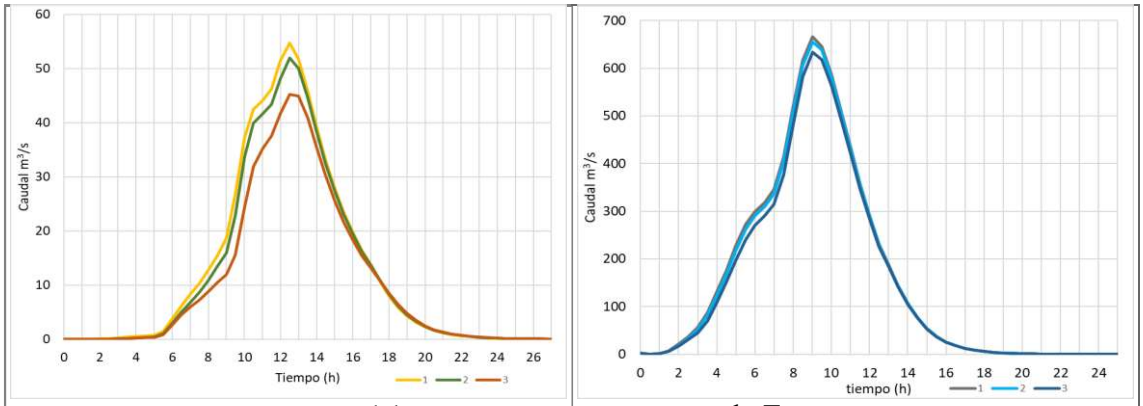


a. Tormenta modal

b. Tormenta extrema

Figura 11. Volumen para cada una de las subcuencas (Sc) en los escenarios 1,2 y 3 para una tormenta modal (gráfico a) y una tormenta extrema (gráfico b).

El hidrograma resultante (Fig. 12), identifica que el Caudal pico se obtuvo a en el mismo momento para los tres escenarios (a la hora 13 desde el inicio de la tormenta modal y a la hora 8,5 desde el inicio de la tormenta extrema).



a. Tormenta modal

b. Tormenta extrema

Figura 12. Hidrograma de escorrentía de los escenarios 1,2 y 3 frente a una tormenta modal (a) y una tormenta torrencial (b).

DISCUSIÓN

Los análisis de estos resultados denotan que de acuerdo a el tipo de uso de suelo y vegetación de de todos los escenarios planteados, sumando el grupo hidrológico y la morfología de cada una de las subcuencas efectivamente generan un escurrimiento proporcional a estas características demostrando que, a nivel generalizado de la cuenca, se observa una relación de NC elevados y escurrimiento superficial positiva como es esperado para NC altos como los obtenidos. Las pérdidas por infiltración son parciales en ambos eventos climáticos para todos los escenarios planteados, siendo proporcionalmente mayor en el evento modal con respecto al evento torrencial, donde el caudal de avenida es correspondientemente mayor al comparar la relación entre la infiltración y el escurrimiento superficial.

A nivel general, los resultados muestran que frente a un evento pluvial el agua tardará mucho más en infiltrarse en los complejos con presencia de Pastizal con roca, debido a su nivel de degradación actual, sumandole el grupo hidrológico D, favoreciendo de este modo el escurrimiento superficial y sus posibles efectos adversos, siendo mínima la tasa de infiltración en estas áreas donde convergen tal como demuestran Delgado et al, (2017) en un estudio de infiltración en una cuenca aledaña. La presencia de mejoras conservacionistas en las actividades agropecuarias representa una estrategia efectiva de manejo del recurso suelo-agua-vegetación favoreciendo a la infiltración en comparación con cultivos y pasturas sin medidas conservacionistas. Particularmente se vuelven más efectivas estas medidas frente a tormentas de carácter modal, mientras que para tormentas de carácter torrencial el volumen escurrido para los diferentes escenarios no logra prácticamente diferenciarse.

La superficie con curvas de nivel como práctica conservacionista representan sólo un 11% de la superficie de la cuenca mientras que las zonas agrícolas sin prácticas conservacionistas representan el 40% de la superficie total. Entre ambos usos de suelos caracterizado por ser coberturas semi-permanentes conforman alrededor del 51% de la superficie de la cuenca, consecuencia de un proceso de "agriculturización" que se traduce en la reducción de áreas destinadas a pastizales naturales y pasturas que deviene en el aumento de la escorrentía superficial (De Antueno et al, 2020). En orden escorrentía, el escenario 1 es el que mayores valores presenta, siguiéndole el escenario 2, planteado como el más preciso en el estado actual de la CASCH. Por último, el escenario 3 es el que menores valores de escorrentía presenta debido al pastizal en curvas de nivel, coincidiendo con que las coberturas permanentes disminuyen el escurrimiento.

Las subcuencas 1 y 5 fueron determinadas por Guzman et al, (2021) como las subcuencas que expresan una mayor fragilidad para la CARSCH, coincidiendo con los resultados en cuanto a mayor volumen de escurrimiento superficial, indicando una mayor torrencialidad con una potencial alta descarga de sedimentos y una alta peligrosidad sobre los asentamientos urbanos ubicados adyacentes a los cursos de agua y particularmente de la subcuenca 5 donde están ubicadas las dos localidades que la cuenca alberga.

CONCLUSIONES

Este estudio logró analizar cómo varía el escurrimiento superficial si se modifica la cobertura y uso de suelo ante un evento extremo de precipitación y con uno modal, proporcionando información de la interacción entre la cobertura vegetal y el efecto de tormentas de igual duración y distinta intensidad. Esta interacción permite proyectar y pronosticar la influencia sobre la escorrentía superficial según el uso del suelo a nivel geoespacial. Los análisis de los resultados dieron que el escurrimiento frente a una tormenta modal es más sensible ante el cambio de uso de suelo de los escenarios planteados. Mientras que, ante un evento extremo, la morfometría de la cuenca es la que determina la generación de caudales en mayor medida demostrando menor sensibilidad en el cambio de uso de suelos.

REFERENCIAS

Albouy, R. & Bonorino, G. Hidrogeología de la cuenca superior del Río Sauce Chico. Sierras Australes. Provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica de Argentina. 52(1), 81-92. (1997).

Cristiano, G. & Quartucci, E. Caracterización del sector hortícola de Bahía Blanca. Propuestas para su reconversión. FACES. Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Centro de Documentación, vol. 21(44), pp 49-67. (2015).

De Antueno, L., Gaspari, F.J. & Guzmán Guaraca, A. Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. Revista Estudios Ambientales, 8(1), 20-42. (2020).

Delgado M. I. Gaspari F. J. Senisterra G. E. Respuesta a la infiltración en distintos complejos suelo-vegetación en las sierras de Ventania, Argentina. (2017).

European Environment Agency. CORINE Land Cover. Commission of the European Communities. (1994).

Frangi, J.L. & Bottino O. Las comunidades vegetales de la Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía (UNLP), 71 (1), 93-133 (1995).

Fundación de la Universidad Nacional del Sur FUNS. Prefactibilidad, sistematización y aprovechamiento de la cuenca del Río Sauce Chico. FUNS. 40 Volumen 8N°1, año 2020 (2011). ISSN: 2347-0941

Gaspari, F.J. Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G.) (Tesis de maestría). Universidad Internacional de Andalucía sede Iberoamericana Santa María de la Rábida. España. (2007).

Gaspari, F. J., de Antueno, L., Guzmán, A. & Montealegre Medina, F. A. Zonificación del riesgo de erosión hídrica-ambiental en el sistema serrano bonaerense. III Jornadas Internacionales y Nacionales de Ambiente. (2021).

Gaspari, F. J., Senisterra, G. E. & Díaz Gómez, A. R. Modelización hidrológica con L-THIA en la Cuenca Alta del Arroyo Napaleofú, Buenos Aires, Argentina.XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná. Argentina. 8 p. (2015).

Guzmán Guaraca, A., de Antueno, L. & Gaspari, F.J. Análisis de la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica en la cuenca alta del Río Sauce Chico, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía. La Plata Volumen 120. Número 1 de 2021.En edición. (2021).

Harbor, J.M. A Practical Method for Estimating the Impact of Land-Use Change on Surface Runoff, GroundwaterRecharge and Wetland Hydrology, Journal of the American Planning Association, 60:1, 95-108, DOI: 10.1080/01944369408975555 (2007).

Kristensen, J., & Frangi, J.L. "Mesoclimas de pastizales de la Sierra de la Ventana". Ecología Austral. 5, 5-64. (1995).

Long, M., G. Peter & Villamil, C. Asteraceae del Sistema de Ventania, Buenos Aires, Argentina. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica. 39. 159-169. (2004).

Michalijos, M.P. & Zapperi, P.A. Análisis morfométrico aplicado a la caracterización de redes fluviales para la gestión de peligro de incendios forestales. Revista del Departamento Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Año XIV, N°15, pp. 53-70. (2015).

Navarro, E. & Cano, D. Análisis morfométrico comparativo de los tramos superiores de las cuencas de los arroyos Sauce Chico, Napostá y Sauce Grande, Sierras Australes, uso de técnicas digitales. Trabajo presentado en el IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017. Quilmes, Buenos Aires, Argentina. (2017).

Pérez, C. A, & Frangi, J. L. Ciclos de macronutrientes en pastizales serranos de Sierra de la Ventana. Ecología austral, 17(2), 199-216. (2007).

Picardi, M. & Giacchero, A. Productividad de la tierra agrícola en el sudoeste bonaerense. E-Estudios Económicos, 32(65). (2015).

Rodríguez Vagaría, A.M. & Gaspari, F.J. Modelización espacial del escurrimiento medio anual en la cuenca serrana bonaerense. Séptimo Congreso de la Ciencia Cartográfica "Logros y desafíos de la Cartografía". Buenos Aires. Argentina. (2014)

Soil Conservation Service (SCS). Hydrology. Part I. Watershed Planning. S.C.S. National Engineering Handbook. Section 4. U.S. Department of Agriculture. 33 pp. (1964).

Torrero, M. Río Sauce Chico: Estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable (Tesis doctoral). (2009).

Villalobos, A.E. Invasión de Pinus halepensis Mill. en el Parque Ernesto Tornquist en relación con el pastoreo de caballos cimarrones. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Buenos Aires. 137 pp. (2009)

Wang, Y., Choi, W. & Deal, B. M. Long-term impacts of land-use change on nonpoint source pollutant loads for the St. Louis metropolitan area, USA. Environmental Management, 35(2), 194-205. (2005)

Zalba, S. M. & Cazzaniga, N. Forestación en el Parque Provincial Ernesto Tornquist cuando los árboles son un problema. En: Vaquero, M. C. (comp.). 2002 territorio, Economía y Medio Ambiente en el Sudoeste Bonaerense. Bahía Blanca: UNS, pp. 503-516. (2002)

BIOSÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE PLATA A PARTIR DE BIOMASAS FÚNGICAS AISLADAS DE DESECHOS MINEROS

Bustos, Daniela[a]; Hidalgo, Natalia[a]; Allendes, Jorge[b]; Senese, Ana[a]; García, Laura[c,d]; Castro, Inés[a]

[a]*Instituto de Investigaciones Mineras, FI, UNSJ, Av. Libertador Oeste 1109, J5400ARL San Juan, Argentina*
[b]*Instituto de Ciencias Básicas, FI, UNSJ, Av. Libertador Oeste 1109, J5400ARL San Juan, Argentina*
[c]*Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y el Espacio, FCEFyN-UNSJ, CONICET, Av. España Sur 1512, J5402DSP, San Juan, Argentina*
[d]*Instituto de Mecánica Aplicada, FI, UNSJ, Av. Libertador Oeste 1109, J5402DSP San Juan, Argentina*

e-mail: dbustos@unsj.edu.ar

RESUMEN

La nanotecnología es una disciplina en rápido crecimiento que se ocupa de la síntesis y el desarrollo de diversos nanomateriales. En la actualidad, se están preparando varios tipos de nanomateriales metálicos como cobre, zinc, titanio, magnesio, oro y plata Diversas investigaciones han recurrido al uso de sistemas biológicos para la síntesis de nanopartículas como alternativa a métodos químicos y físicos, ya que varios microorganismos son bien conocidos por producir materiales inorgánicos ya sea de manera intra o extracelular. En este estudio se biosintetizaron AgNPs utilizando biomasa muerta y seca de los hongos Talaromyces amestolkiae y Penicillium cluniae aislados de desechos mineros. Para ello se suspendió 1gr de biomasa inerte de cada hongo en 20 mL de una solución de $AgNO_3$ 0,1 M, con agitación a 100 rpm y 40℃ durante 3 días, tomando muestras luego de 48 y 72hs. Las muestras se analizaron por espectrofotometría UV-visible (300-600nm) y microscopía electrónica de barrido. Se observó una banda de plasmón con un máximo de absorbancia a 450 nm para Penicillium cluniae y un plasmón menor a 460nm para Talaromyces amestolkiae, con una amplitud entre los 420-470 nm, lo que confirma la obtención de las nanopartículas de plata y el poder reductor de la biomasa fúngica. Los resultados de microscopía confirmaron la presencia de AgNPs retenidas dentro de la biomasa y en su superficie, por lo que el método de biosíntesis fiable y económico utilizado en este trabajo resulta prometedor frente a la posibilidad de darle una utilización a hongos aislados de desechos de la industria minera.

Palabras Clave Nanopartículas de plata, Biosíntesis, Hongos filamentosos, Desechos mineros

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es una disciplina enfocada en el desarrollo de nuevos materiales con propiedades logradas mediante el control de la materia a escala nanométrica, actualmente en rápido crecimiento (Salvador, M. et al, 2015). Mediante diversos métodos de síntesis, es posible obtener nanopartículas metálicas de distinta naturaleza. En particular, las nanopartículas de plata (AgNPs) se han convertido en foco de investigación debido a su amplia aplicación como antimicrobianos, en óptica, como catalizadores y en la producción de biomateriales (AbdelRahim, K, et al. 2017).

Cada vez es más necesario desarrollar procesos y productos limpios, no tóxicos y respetuosos con el medio ambiente ("Química Verde"). Por esta razón, diversas investigaciones han recurrido al uso de sistemas biológicos para la síntesis de nanopartículas como alternativa a métodos químicos y físicos, ya que varios microorganismos son bien conocidos por producir materiales inorgánicos ya sea de manera intra o extracelular (Priyabrata M.,Ahmad et al., 2001). En la síntesis de AgNPs, los hongos filamentosos son usados con mayor preferencia que las bacterias por su fácil manipulación (Rodrigues, A. et al, 2012).

En este estudio se biosintetizaron AgNPs utilizando biomasa muerta y seca de los hongos *Talaromyces amestolkiae* y *Penicillium cluniae* aislados de desechos mineros. El análisis por espectrofotometría UV-visible y microscopía electrónica de barrido, se realizaron para identificar la presencia de las nanopartículas de plata y el poder reductor de la biomasa fúngica.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Obtención de biomasa fúngica

Los hongos utilizados en este trabajo fueron aislados a partir de las pilas de lixiviación de la Mina Hualilán (San Juan) y conservados por los autores del trabajo Hidalgo, N., 2020.

Para la generación de biomasa, en primer lugar, se inoculó la cepa en medio líquido en estufa de cultivo a una temperatura de 28°C hasta su máximo crecimiento desarrollado en un tiempo total de 15 días. El medio de cultivo utilizado fue Sabouraud Glucosado caldo a volúmenes crecientes. Como el objetivo es generar una biomasa inerte, una vez que la cepa llegó a su máximo desarrollo, se esterilizó en autoclave a 121°C durante 15 minutos. Después se procedió a lavar la biomasa repetidamente con agua destilada y por último se secó en estufa a 80° C hasta peso constante.

Biosíntesis de nanopartículas de plata.

Para la síntesis de NP utilizando biomasa de los hongos *Talaromyces amestolkiae* y *Penicillium cluniae*, se suspendió 1gr de cada biomasa en 20 mL de una solución de $AgNO_3$ 0,1 M, pH 7,5, con agitación a 100 rpm y 40°C durante 3 días, tomando muestras a las 48 y 72hs. De manera paralela se llevó a cabo un control de cada hongo, suspendiendo 1gr de cada biomasa en 20 mL de agua destilada.

Medición por espectrometría UV-visible

La biotransformación de los iones de plata se monitoreó mediante la medición del espectro UV-visible del medio de reacción. Se tomaron 3 mL de sobrenadante después de 48 y 72 hs y se analizaron por espectrofotometría UV-visible mediante Espectrofotómetro Shimadzu UV-1800 (Lab Wrench, Canadá) en la longitud de onda que va de 300 a 600 nm.

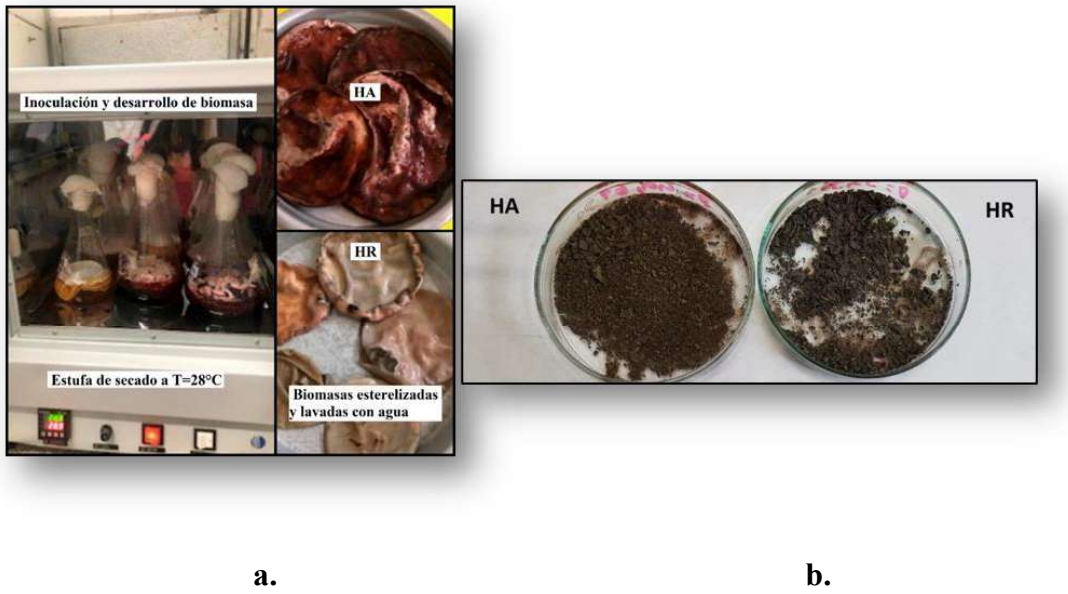
Microscopía electrónica de barrido

Las AgNPs se identificaron y caracterizaron en ambas biomasas, mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: Scanning Electron Microscope) EVO MA 10W de la compañía Carl Zeiss. El mismo tiene acoplado un cabezal para la obtención de imágenes de electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés: Backscattered Electrons) y un sistema de microanálisis por espectroscopía de rayos X dispersiva en energía (EDS, por sus siglas en inglés: Energy Dispersive Spectrometry). El mismo se encuentra instalado en el Instituto de Investigaciones Mineras de la Universidad Nacional de San Juan.

Para su análisis, cada biomasa se montó en portamuestras individuales y se recubrió con un depósito de oro para lograr muestras conductoras y evitar la acumulación de carga en su superficie luego de la interacción del haz de electrones con éstas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La disposición experimental para la obtención de las biomasas fúngicas se evidencia en la figura 1. En el cultivo de ambos microorganismos se obtuvo el mayor crecimiento fúngico a los 12 días, siendo mayor para el género *Talaromyces amestolkiae.*



a. **b.**

Figura 1. a. Generación de Biomasa, **b.** biomasa seca. Donde HA= *Talaromyces amestolkiae* y HR= *Penicillium cluniae*.

A continuación, se presentan los resultados de la medición de la absorbancia por espectrometría UV-visible de las muestras líquidas tomadas a las 48 y 72 horas en la longitud de onda que va de 300 a 600 nm para ambos hongos.

Para el hongo *Talaromyces amestolkiae* se observó un plasmón con un pico máximo a 460nm a las 72hs, con una absorbancia de 0,1526. De los resultados de microscopía electrónica, presentados luego en esta sección (figura 3.a), la biomasa de este hongo es más porosa, por lo que las NPs podrían quedar retenidas dentro de la misma y disminuir la concentración en el sobrenadante, correlacionándose con el plasmón de menor absorbancia para este hongo.

Para el caso del hongo *Penicillium cluniae*, se observó una banda de plasmón con un máximo de absorbancia de 0,3248 a 450 nm luego de 72 horas.

Para ambos ensayos se pudo observar un plasmón con una amplitud entre los 420-470 nm característico de las AgNPs(figura 2), lo que confirma la obtención de estas nanopartículas y el poder reductor de la biomasa fúngica inerte de ambos hongos. Similares resultados fueron obtenidos por Priyabrata A., et al. 2001.

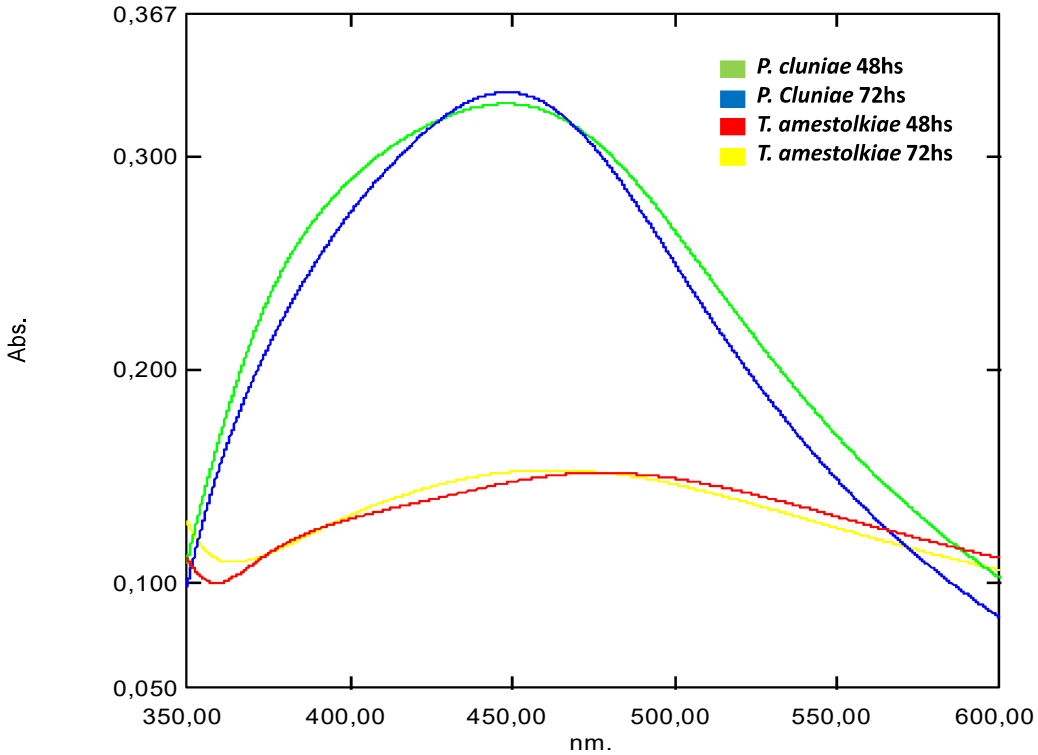


Figura 2. Análisis por espectrometría UV-visible.

Las imágenes de electrones retrodispersados presentadas en la figura 3, permiten distinguir las AgNPs por su alto peso atómico frente a la materia orgánica de la masa fúngica. En ambos casos, las imágenes de BSE se encuentran acompañadas por los espectros de rayos X resultantes de los análisis puntuales (indicados con un número de referencia en color verde en la figura 3) de EDS en las potenciales partículas. Si bien el haz de electrones forma una gota en su interacción con la materia, de un ancho del orden de los µm, la ausencia de otros metales en la muestra en combinación con su tamaño < 1 µm, permite identificar inequívocamente la presencia de AgNPs. Las nanopartículas se encontraron tanto en la superficie como en el interior de la masa fúngica.

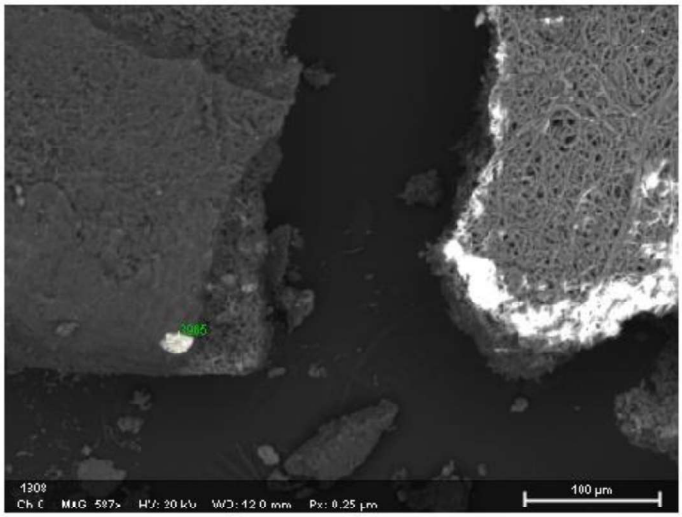
La figura 3a corresponde a las células fúngicas tras su exposición a una solución acuosa de $AgNO_3$ 0,1 M durante 72 hs (a la izquierda biomasa del hongo *Penicillium cluniae* y a la derecha biomasa del hongo *Talaromyces amestolkiae*).

Se observa la presencia de nanopartículas de plata distribuidas en la superficie y en el interior de ambas biomasas fúngicas, lo que indica que las nanopartículas formadas por la reducción de iones Ag^+ están unidas a la superficie de las células.

Las nanopartículas de plata que se observan fuera de los micelios, podrían ser el resultado de una unión débil en combinación con un desprendimiento sufrido durante el montaje de la muestra para su estudio mediante SEM.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

a.



b.

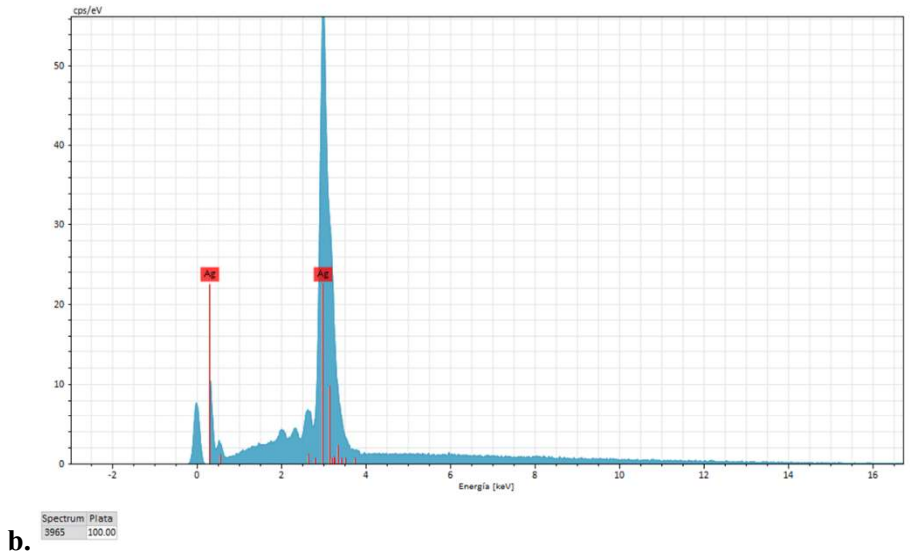


Figura 3. Imágenes de BSE sobre las potenciales AgNPs, las que se distinguen por su mayor intensidad, y análisis EDS efectuados, los cuales son señalados con una referencia numérica en color verde. **a.** A la izquierda biomasa del hongo *Penicillium cluniae* y a la derecha biomasa del hongo *Talaromyces amestolkiae.* **b.** Análisis EDS de la AgNP señalada en a.

En el desarrollo de la metodología propuesta para ampliar el alcance de los microorganismos en la síntesis de nanomateriales, se puede apreciar que los hongos *Talaromyces amestolkiae* y *Penicillium cluniae*, cuando se exponen a una solución acuosa de $AgNO_3$, provocan la reducción de los iones metálicos y la formación de nanopartículas de dimensiones bien definidas.

CONCLUSIONES

En conclusión, el siguiente trabajo hace un aporte importante a la Química Verde en cuanto a síntesis de AgNP mediada por biomasa inerte de hongos aislados de desechos

mineros. Entre las ventajas que se destacan: es un proceso llevado a cabo bajo condiciones ecoamigables, la facilidad con la que se puede ampliar la escala del proceso, la viabilidad económica, como así también la posibilidad de cubrir fácilmente grandes superficies mediante el crecimiento del micelio.

REFERENCIAS

Abdel Rahim, K, Younis Mahmond, S., Mohamed Ali, A., Salmeen Almaary, K., Mustafa, A and Moussa, S. Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using *Rhizopus stolonifer*. *Saudi Journal of Biological Sciences* 24, 208–216 (2017).

Salvadori, M., Rómulo, A., Oller Nascimento and C., Correa, B. Extra and Intracellular Synthesis of Nickel Oxide Nanoparticles Mediated by Dead Fungal Biomass. *PLoS ONE* 10(6): e0129799. (2015).

Priyabrata M.,Ahmad, A. Mandal, D., Senapati, S., Sainkar, S. Khan, M., Parishcha, R., Ajaykumar, P., Alam, M., Kumar, R. and Sastry, M. *NANO LETTERS* Vol. 1, No. 10,515-519 (2001).

Rodrigues, A., Ping, L. Y., Marcato, P., Alves, O., Silva, M., Ruiz, R., Melo, I., Tasic, L. and De Souza, A. Biogenic antimicrobial silver nanoparticles produced by fungi. *Appl Microbiol Biotechnol* DOI 10.1007/s00253-012-4209-7 (2012).

Hidalgo, N., Mamani, A., Mestre, A., Fernández, P., Bustos, D. Biosorción de plomo por biomasa de origen fúngico aislada a partir de desechos mineros de la Mina Hualilán, Argentina. *Serie Correlación Geológica*, 36 (1-2): 39 – 52 (2020).

RAILWAY ARCHEOMETALLURGY: TECHNOLOGICAL, HISTORICAL, CULTURAL AND GEOGRAPHIC MAP THAT ILLUSTRATES THE METALLOGRAPHIC STUDIES ON DIFFERENT RAILWAY ELEMENTS AND THE INSTITUTIONAL LINK WITH THE RAILWAY MUSEUMS

Patricia Carrizo[a], Rubén Lepez[b] y Miguel Sepúlveda[c]

[a]*Área de Arqueometalurgia,Departamento de Electromecánica, Laboratorio Metalurgia, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza UTN FRM, ARGENTINA.*
[b]*Museo Ferroviario Estación Benegas, ONG Ferroclub Trasandino, Mendoza, ARGENTINA.*
[c]*Museo del Viejo Expreso Patagónico "La Trochita", Esquel, Chubut, ARGENTINA.*

e-mail: patricia.carrizo@frm.utn.edu.ar

ABSTRACT

The present work addresses reverse engineering studies applied to different railway and historical elements, which were carried out in the Archaeometallurgy Area belonging to the Metallurgy Laboratory of the National Technological University Mendoza Regional Faculty (UTN FRM) and with which it is intended to manage an interactive map. The metallic railway pieces are the protagonists and were donated for study as a result of collaboration with different museums, such as: the Godoy Cruz railway museum, the San Rafael railway museum and the museum of the Old Patagonian Express "La Trochita" in Esquel, province of Chubut. Thus, from the Archaeometallurgy Area, various analytical and metallographic studies have been carried out on railway parts, including: chemical composition using a portable X-ray spectrometer, Brinell hardness studies with portable and bench durometers, as well as metallographic analyzes that reveal characteristics manufacturing. All these studies allow, through archaeometallurgy and materials science, to translate different technical aspects, which are related to historical-cultural aspects, and which provide important information when interpreting the results. The final objective of this project is the generation of a didactic map, which in the future will be interactive, connecting the different museums with which a link was established and railway parts were analyzed, where technical data of the studied parts can also be added and as well as historical, geographical, tourist, economic, social and cultural data of each area where the different museums mentioned above are located, and that this map be consultable and therefore, expand our network of links and collaboration.

Keywords: Archaeometallurgy, Railway, Interactive, Technology, Map

INTRODUCTION

As mentioned in the Abstract, this article shows the pieces analyzed over time since the collaborative work began with various railway museums and groups friends of the railway, who have supplied railway pieces such as: fixing elements, rails, fish plates, screws, etc. so that from the Archaeometallurgy Area of the UTN Regional Mendoza they will be studied and in counterpart the museums have received a technical report or participated in heritage conferences that they have organized. And the objective for the future is to be able to place all this technical information on a digital interactive map,

where the links made to date can be shown and future links with other museums in the rest of the country can be added, and place geographical, tourist and historical.

The first museum that collaborated with was the San Rafael Railway Museum, and from which a threaded bolt and a fixing nail were studied, as well as a corresponding historical revisionism was carried out. Also this article speaks about the conection with the Benagas Station Railway Museum from Godoy Cruz, Mendoza with the study of a wide gauge rail profile and in adition the conection with the Old Patagonian Express Railway Museum From Esquel, in Chubut province, in Argentina.

The Buenos Aires Pacific Railway (BAP) was the British capital company that operated a network of wide gauge railways (1,676m) in Argentina during the latter part of the 19th century and the first half of the 20th century. Its objective was to unite the city of Buenos Aires with the Pacific Ocean, specifically, the Port of Valparaíso, Chile. For this, it acquired the existing company of the Great Western Argentine Railroad in 1907. The Great Western Argentine Railway was created in 1887, the same year in which it acquired the state-owned Andean Railroad, which owned 518 km of railways between Saint Louis and Mendoza.

On the 8th of November, 1903, for the first time, a locomotive arrives at the San Rafael station (see Fig.1). This was the N°315 locomotive from the Argentine Great Western Railway, nicknamed “The Builder”. The main promoter for the rail network expansion in this region was Don Rodolfo Iselín. Born in France, he arrived to Argentina in 1884 with that objective, and thus allowing for an easier way to transport regional fruits and vegetables products. In this way, it manages to transform itself into a regional system that met the needs of the area. During all this period of time, there was a tough competition against the Buenos Aires Railroad to the Pacific, this last achievement absorbing the Argentine Great Western Railway and by administration of the national government its administration is granted for a period of 20 years (Lewis C., 1983).



Figure 1. The arrival of the railway to San Rafael.

THE ARRIVAL OF THE RAILWAY TO MENDOZA

The Andean Railway arrived in Mendoza on April 7, 1885, for the event the president of the Nation Julio A. Roca arrived in Mendoza in a special train, and thus Mendoza was linked to Buenos Aires (national capital) with exit to the port located in the Atlantic Ocean and this caused a change in the economic orientation of Mendoza, which was previously economically oriented towards the Pacific Ocean. Travel time, which had taken between one to two months by wagon for 300 years, now was reduced to 48 hours by train. For

the year 1887, the National Government transferred the Andean Railway to the company Great Western Argentine Railway, therefore Mendoza and other neighboring towns, in the region in the year 1907 became part of the Buenos Aires to Pacific Railway (BAP). (Carrizo P. et al, 2022)

THE PLANNING OF THE OLD PATAGONIAN EXPRESS RAILWAY

After World War I, the Argentine government finally decided to build the branch of the Old Patagonian Express using the economic gauge width of 750 mm. In the unique post-war context, the 750 mm narrow gauge was then considered a real possibility. For passenger services, locomotives with a gauge of 750 mm were available, and this cheaper alternative was chosen for the line that would reach Esquel.

In 1921, the laying of the line connecting the town of Engineer Jacobacci (Río Negro province) with the city of Esquel (Chubut province) was agreed (Fig.4). This line would be called the Light Railways of Patagonia, and by November 1921 the purchase of materials for cheap railways began: some 200,000 rails were purchased from the Thyssen Industrial and Trade Company Ltd. (Thyssen was a major German steel company) and another 80,000 rails and fastening systems to Société anonymous d'Ougrée-Marihaye (Ougrée-Liege, Belgium). The first train entered the city of Esquel (Chubut province, Argentina), on May 25, 1945. (Sepiurka, S. and Miglioli, J., 2001)

INTRODUCTION TO THE CONCEPTS RELATED TO RAILWAYS AND THEIR COMPONENT ELEMENTS

This research work consists of studying two typical railway elements: threaded bolt and fixing nail, both are a constitutive part of any railway track, in this case the railroad tracks were built by the Argentine Great Western Railway, a company that was later acquired by as Buenos Aires to Pacific Railways (BAP) and nowadays, these pieces (threaded bolt and fixing nail) belong to the San Rafael Railway Museum, Mendoza-Argentina.

Fixings: Fixing is the main small material used for fixing the rails to the sleepers.

The main functions that must be performed by rail fasteners are as follows:

• Fix the rails to the sleepers.

• Ensure the invariability of the trail.

• Facilitate the transfer to the infrastructure of the track (platform) of the static and dynamic efforts exerted by the rolling stock on the structure of the track (railway package).

• Possess mechanical strength and constant elasticity throughout the long life of the fixation.

• Contribute to good electrical insulation between both rails.

• Small number of pieces, which will facilitate their manufacture, placement and conservation.

• Have low cost.

The fixings for wooden sleepers can be divided into rigid and elastic by the way of carrying out the support and by the type of support in direct (without saddles) and indirect (with saddles).

• Rigid fixings (without saddles), is the nail hook (see Fig. 2) and the screw.

• Elastic fixings (without saddles), we have the single and double elastic nail, the shun and gauge-lock (Pandrol clip) (see Fig. 3), etc.



Figure 2. Hook type fixing nail.



Figure 3. Gauge-Lock (Pandrol clip)

Bolts for tracks: The bolts are cylindrical body screws with a threaded or threaded end and very varied heads, which serve to secure the plates to the rails. It tends to give the head of the bolts a square or quadrangular design, and some with a diamond-shaped upper face. IRAM-FA Standard L 70-06 - June 84 - BULONS FOR ROAD defines the technical requirements that must meet the track bolts in their material, manufacturing tolerances and requirements for approval.
Not only bolts are used for joints but also for other uses such as component of track apparatus. The fixing parts (see Fig. 4) for the rails are manufactured following a variety of standards that consider dimensions, materials and tolerances. (Table I)
They are usually manufactured from a single solid piece which, through different machining, is given the required shape. In the case of bolts, one of the processes is that by which the thread is formed. The pieces that are used are treated superficially to give them better properties.

Table I. Chemical composition of fixing nails currently

%C	%Mn	%Si	%P	%S
0,37 -0,75	0,86 – 1,74	0,30 Max	Less than 0,05	Less than 0,05

EXPERIMENTAL METHODOLOGY OF THE PIECES STUDIED

The pieces received to investigate are: a threaded bolt type and fixing nail used in the section of the BAP railroad that connected Mendoza city with San Rafael city situated in the south of Mendoza province. Both pieces belong to the San Rafael Railway Museum. The threaded bolt (see Fig. 5) would have the function of distribution of the efforts on the rails. The fixing nail would have as main application the subjection of the rails to avoid the width variations of the gauge or separation of the railway tracks.

 ISBN: 978-987-1323-89-0



Figure 5. Threaded bolt, where the print of a letter B (BAP) is seen.

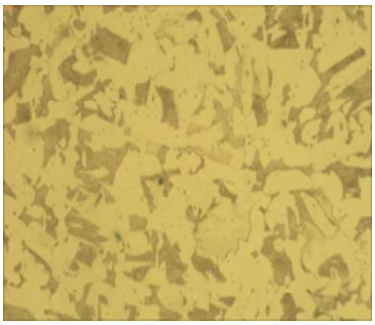


Figure 6. Fixing or clamping nail.

METALLOGRAPHY OF THREADED BOLT



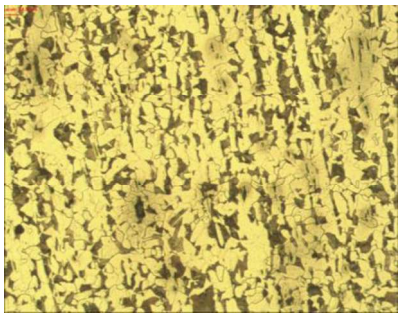
Figure 7. Bolt Head



Micrograph 1. Metallography obtained, 200X



Figure 8. Threaded Bolt



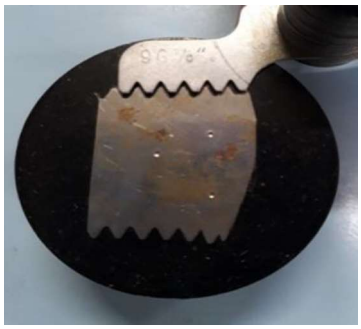
Micrograph 2. Stem zone metallography, 100X

Table II. Chemical composition of the threaded bolt

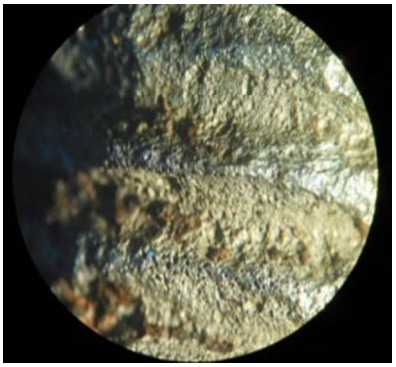
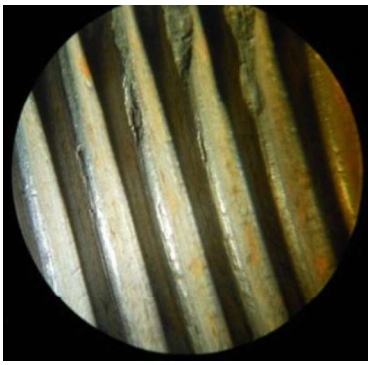
% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mo	% Ni	% Al	% Cu	% Fe
0,28	0,043	0,83	0,017	0,042	0,003	0,014	0,004	0,03	98,6

 ISBN: 978-987-1323-89-0

IDENTIFICATION OF THE TYPE OF THREAD

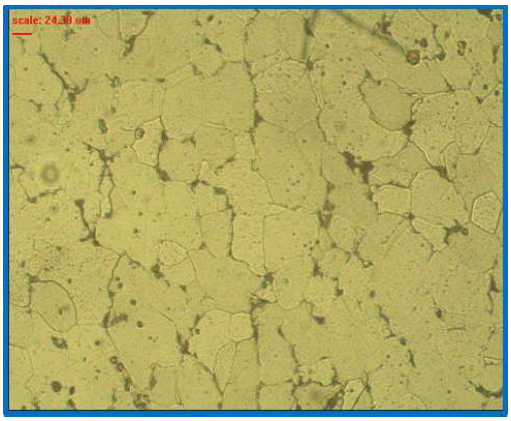
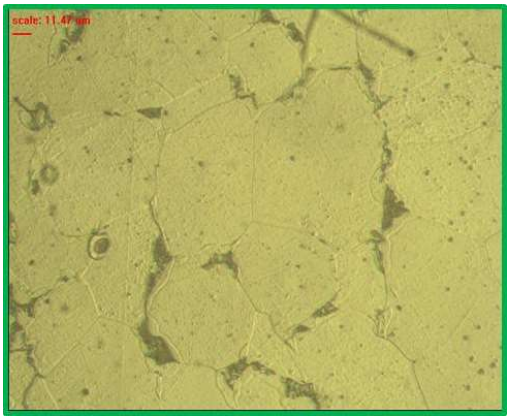
a  b 

Figures 9. a. The threaded bolt that was studied. **b.** Proper way of measuring the thread using the thread comb.

a  b 

Figures 10. a. Corrosive damage to thread steaks, **b.** thread steaks detail with binocular stereomicroscope.

METALLOGRAPHY OF FIXATION NAIL

a  b 

Micrographs 3. Nail metallographs, **a.** magnification 100X and **b.** magnification 200X.

Table III. Chemical composition of the fixing nail

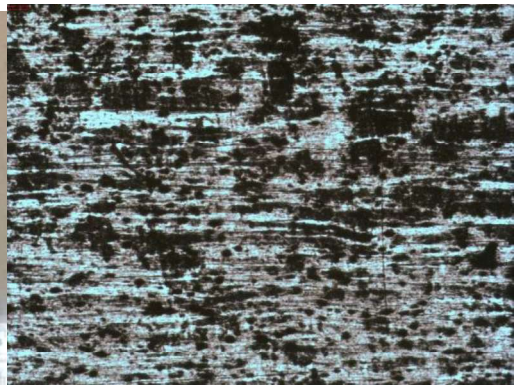
% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mo	% Co	% Cu	%Al	%Fe
0,083	0,005	0,61	0,026	0,062	0,003	0.014	0,017	<0,003	98,6

 ISBN: 978-987-1323-89-0

RAIL PROFILES CEDED BY THE BENEGAS STATION RAILWAY MUSEUM



Figure 11: P50 rail, sovietic origin.



Micrograph 4: P50 structure, 50X

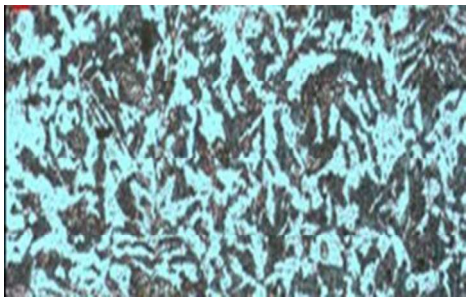
Table IV. Chemical composition of the P50 rail profile

% C	% Si	% Mn	% P	% As	% Mo	% Ni	% Al	% Cu	% Fe
0,79	0,18	0,66	0,033	0,13	0,010	0,070	0,014	0,022	97,8

NARROW GAUGE RAIL PROFILE FROM OLD PATAGONIAN EXPRESS "LA TROCHITA"



Figure 12: Narrow gauge rail.



Micrograph 5: Narrow gauge rail structure, 100X

Table V. Chemical composition of the narrow gauge rail profile

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mo	% Cr	% Ni	%Al	%Fe
0,45	0,040	0,69	0,062	0,066	0,010	0.023	0,040	0,005	98,3

RESULT AND DISCSUSION

In the metallography of the threaded bolt head (see Fig. 7), a ferrite-perlite structure is observed (Micrograph 1). It is observed in the micrographs that there is a decrease in the grain size of the constitutive raw material due to the machining work performed on the piece. The machining that would have been carried out is of the head type "drop of bait", due to its final shape, typical of the first epochs of railways.

The micrograph of the threaded bolt rod (see Fig. 8) show a cast iron structure of high strength of low alloy and low carbon content (0.28%) is observed. It is a structure of the ferritic-perlitic type. Which would have received a hot rolling or forging work

 ISBN: 978-987-1323-89-0

(Micrograph 2), through which the piece is shaped and to give greater resistance to the material of the piece itself. (Lindenvald N., 1980)

According to the chemical composition (Table II) obtained by means of the Spectro Sort Spectrometer of argon spark, it can be said that it is similar to a SAE 1030 steel of those currently used. The hardness value of the material obtained was 80 HB.

From the measurement of the thread (see Figs. 9 and 10), at that time, the types of standardized or specified threads were not yet, so the thread comb does not match the sample under study. However, the one that most closely resembles is the 9 G 7/8" of the current metric system.

By means of the binocular stereomicroscope (see Figs. 10), the corrosion on the thread can also be observed in greater detail. In this sense, it is observed that the corrosive damage has not been very serious and is mainly due to atmospheric type corrosion.

The micrograph of the fixing nail (see Micrograph 3), it is observed that it is a ferrite-perlite structure, that is, it is low carbon (0.08%) cast iron. The ferric carbide deposited in the limits of the grain edge of the ferrite structure is observed in order to give it hardness. It would correspond nowadays with SAE 1008 steel (Table III). The hardness value obtained by the tests performed gave 90 HB. (William S. and Hashemi J., 2006)

As for the threaded bolt, it is a connecting element, in which there is a difference in the size of grain between the parts of the head and the stem. These differences are due to the different types of machining in the production process.

On the other hand, the fixing nail has a metallographic structure where the carbon is deposited at the borders of the grain edge which gives it strength and functional characteristics, this deposited carbon would be forming a kind of shell or shield to protect the material and make it more resistant. Similar to what is achieved are a heat treatment of today called: cemented, where the material retains a soft heart and its surroundings are hardened, as a protective shield.

At present, the chemical composition of the parts of a railroad is as described below:

• Carbon (C): (0.37 to 0.73%). It increases hardness and wear resistance, but also influences fragility.

• Manganese (Mn): (0.86 to 1.74%). It has an influence on hardness, wear resistance and toughness (not fragile), but decreases weldability.

• Silicon (Si): (0.30%). Increases hardness, wear resistance and facilitates rail rolling.

• Sulfur (S) and Phosphorus (P): (less than 0.05%). They are not desirable because they give fragility, but their elimination is very expensive.

About the P50 wide gauge rail profile (see Fig. 11), its observed that the rail surface has been plastically deformed and that the grain in the region is flattened, the image (Micrograph 4) shows a microstructure of deformed ferrite and pearlite grains due to cold working. The material of the P50 rail, according to the chemical composition data, is a steel with a eutectoid composition. Its composition is similar to what is now known as SAE 1080 steel (Table IV), and the hardness value is 182 HB. (Scott D., 1991).

It is noted that in the microstructure of narrow gauge rail (see Fig.12) ferrite is found precipitated in the form of broad needles within pearlite (Micrograph 5).

This micrograph has been taken on the head's area of the narrow gauge rail. This narrow gauge rail has a low carbon composition with 0,45 wt% C (Table V), this material can be

comparable to current SAE 1045 steel. The hardness is 160 HB. (ASM International, 1995)

CONCLUSION

The Buenos Aires Pacific Railroad (BAP) was called to be prosperous; its objective was to link the City of Buenos Aires with the Pacific Ocean, crossing the provinces of Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba, San Luis and Mendoza. It's played a key role in the emergence of dozens of towns and cities, in agricultural activity and, especially, in the wine industry of the province of Mendoza. The arrival of the railroad contributed to the colonization of the provincial south and its development due to a fast and economic connection with the rest of the country which expedited the movement of goods and people and the expansion of the market through the insertion of regional products.

Prior to the expansion of the railways in Argentina, the main means of transport consisted of carts that circulated on roads to transport the products of the country and also from other places. It took approximately 60 days to get from Mendoza to Buenos Aires. The trains on the other hand, allowed shortening these times to 36 hours, and also the international transit between Chile and Argentina was accelerated. In addition, having reduced transport times for passengers, another way in which trains managed to integrate the localities was through postal services. These services also included the distribution of the most important newspapers of that time, such as the newspaper "La Nación", and thus the information became more accessible. Beginning in 1860, the railroads experienced rapid growth, connecting several capitals in the province of Buenos Aires and other production points with Buenos Aires.

The system was not if its obvious disadvantages, being one of the main ones the fact that the ends of its most important lines did not join, and several important points were out of the connections. The rail system in Argentina consisted, by 1910, of four main lines, all of which had as their starting point the port of Buenos Aires. These four lines were the West Railway, South Railway, Central Argentine Railway and the Buenos Aires to Pacific Railway.

As for the threaded bolt, it is a connecting element, in which there is a difference in the size of grain between the parts of the head and the stem. These differences are due to the different types of machining in the production process. These production processes mentioned, give the pieces the necessary strength to withstand the mechanical stresses to which they would be subjected. Manganese, one of the chemical elements with the greatest presence, provides greater and better ductility characteristics.

On the other hand, the fixing nail has a metallographic structure where the carbon is deposited at the borders of the grain edge which gives it strength and functional characteristics, similar to what is achieved are a heat treatment of today called: cemented, where the material retains a soft heart and its surroundings are hardened, as a protective shield. Being a clamping piece, to behave elastically, therefore the present Mn provides these characteristics with greater ductility and therefore elastic behavior, that is, the material is liable to support loads, bending, without breaking, to then remove the load or mechanical effort, returns to its original form. In this way, a fixing nail transmits efforts, deforms and recovers, maintaining the invariability of the gauge width, the fixing of the sleepers and the electrical insulation.

From the chemical composition analysis, it can be deduced that these rail profiles could be considered as the current SAE 1080 steel for the P50 profile and as the current SAE 1045 steel for the profile belonging to the narrow gauge rail. The quality study carried

out on these historical rails, which belong to different railways in Argentina, also these railway profile have diverse origin and provenances, however, they are of good quality and are in well preserved conditions.

The final objective of this project is the generation of a didactic map, which in the future will be interactive, connecting the different museums with which a link was established and of which railway parts were analyzed, a map where it is possible to add technical data of the studied pieces and also historical, geographical, tourist, economic, social and cultural data of each area where the different previously mentioned museums are located and above all the map must be dynamic to offer the possibility of adding new railway museums and the studies carried out, which be constantly updated and, therefore, serve to publicize the Archaeometallurgy area of the UTN FRM, expanding the established network of links and collaboration.

REFERENCES

ASM International, ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstrutures, 9th ed. (1995).

Carrizo P. et al., “Archaeometallurgical Study of pieces from Buenos Aires to PacIfico Railway (BA&P) in Mendoza, Argentina”. Case Studies on Reverse Engineering on Ancient Metals. In: Carrizo, P.S. (eds) Reverse Engineering of Ancient Metals. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72842-7_12 (2022).

Lewis C., "British Railways in Argentina 1857-1914: A Case Study of Foreign Investment", Londres: Athlone Press (1983).

Lindenvald N., “La estructura de los metales”, 3° Edición, Editorial Géminis S.R.L, Impreso en Argentina, ("The structure of metals", 3rd Edition, Gemini Editorial S.R.L, Printed in Argentina) (1980).

Scott D., “Metallography and Microsturcture of Ancient and Historical Metals”, The Jean Paul Getty Trust, Printed in Singapore, ISBN 0-89236-195-6 (1991).

Sepiurka S. and Miglioli J., “La Trochita. Un viaje en el tiempo y la Distancia en el Viejo Expreso Patagónico” (“The Trochita. A journey through time and distance on the Old Patagonian Express”). GAC Grupo Abierto Comunicaciones (GAC Open Group Communications). ISBN 987-97830-5-0 (2001).

William S. and Hashemi J., “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales”, (“Fundamentals of materials science and engineering”). Mexico D.F.: McGraw-Hill. (2006).

PATRONES DE VARIABILIDAD DE TEMPERATURA MEDIA EN EL OASIS NORESTE DE MENDOZA, ARGENTINA

Martín A. Cavagnaro[a], Francisco Gonzalez Antivilo[c], Diego C. Araneo[b]

[a]*Cátedra de Meteorología Agrícola, FCA, Universidad Nacional de Cuyo, ARGENTINA*
[b]*Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientaes, IANIGLA, CONICET CCT Mendoza, UNCuyo, ARGENTINA.*
[c]*CIGEOBIO, San Juan, ARGENTINA*

e-mail: mcavagnaro@fca.uncu.edu.ar

RESUMEN

El oasis noreste de Mendoza (32° 27' - 33° 28' Lat. Sur y 67° 20'- 68° 52' Long. Oeste) es la subregión vitivinícola más importante de Argentina tanto en superficie cultivada como producción de uva (Vitis vinifera L.). Se pretende determinar los principales patrones de variabilidad de la marcha de temperatura anual, ya que es este parámetro del clima el que, en mayor medida, regula el ciclo del cultivo. Las marchas anuales de temperaturas medias quincenales del noreste de Mendoza (período 1962-2020) se estudiaron mediante Análisis de Componentes Principales, a fin de establecer los patrones mencionados. Las primeras 6 (seis) componentes explican poco más del 60% de la varianza. Los patrones muestran una gran variabilidad temporal, sin tendencias o ciclos marcados durante el período analizado. Componentes de orden mayor representan variabilidades con anomalías alternadas interquincenales a intermensuales, en algunos casos con predominancias de alguna fase para períodos de alrededor de 5 a 10 años. Cambios en los patrones térmicos podrían afectar las distintas fases fenológicas de la vid.

Palabras Clave*:* Temperatura media, *Vitis vinifera*, Patrones de variabilidad térmica, Cambio climático.

INTRODUCCIÓN

Según los informes anuales del Instituto Nacional de Vitivinicultura de 2021(https://www.argentina.gob.ar/inv/vinos/estadisticas), Mendoza es la provincia de Argentina con la mayor superficie de cultivos de vid, con 148.996 ha (70,6% del total del país) y, consecuentemente la mayor productora de uvas y vinos en el país (más del 70% del total de producción nacional). El oasis noreste de Mendoza (32° 27' - 33° 28' Lat. Sur y 67° 20'- 68° 52' Long. Oeste) es la subregión vitivinícola más importante de Argentina (en superficie cultivada y producción de uva *(Vitis vinifera L.)*.

El ciclo de la vid es altamente dependiente de la temperatura y de las adversidades meteorológicas de cada temporada agrícola (Deis, et al., 2015, González Antivilo et al. 2019). Según las predicciones de cambio climático aportadas por el IPCC (2022) es de esperar una posible modificación en las fechas medias anuales de los eventos, y de la duración de cada periodo, con la consecuente afectación en la marcha interanual de los cultivos de vid. A su vez, las condiciones meteorológicas y climatológicas locales que

tienen influencia directa sobre los cultivos, dependen de condiciones atmosféricas de mayor escala espacial (sinóptica a hemisférica) en distintas escalas temporales.

Es necesario, por tanto, conocer las relaciones que se establecen entre las variables climáticas y la biología del cultivo de vid ya que, en contexto de cambio climático, la variabilidad de los elementos del clima puede jugar un papel de suma importancia en el desarrollo del cultivo de vid y, en consecuencia, de su rendimiento y calidad (Agosta et al., 2012).

El objetivo de este trabajo es determinar los principales patrones de variabilidad de la marcha de temperatura anual, ya que es este parámetro del clima el que, en mayor medida, regula el ciclo del cultivo.

MÉTODOS

Se utilizaron datos de temperatura media diaria de las estaciones Mendoza AERO y San Martín (Servicio Meteorológico Nacional). A fin de obtener una serie regional, se calcularon promedios quincenales de temperatura media para el período 1962-2020, promediando ambas bases de datos, ya que las marchas anuales de las mismas tienen una muy alta correlación (r = 0,997).

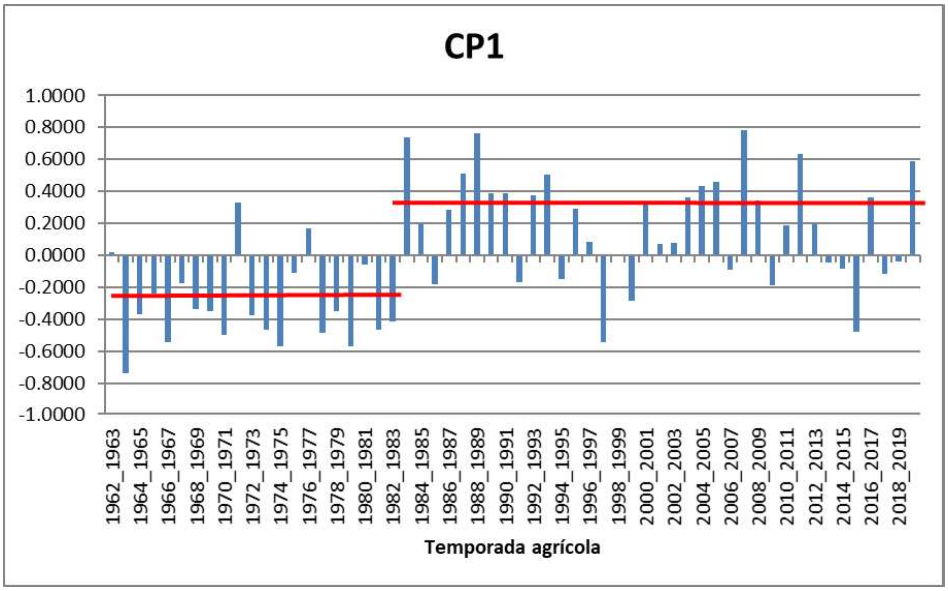
Las marchas anuales de temperaturas medias quincenales entre los meses de mayo y abril (de años contiguos), fueron transformadas en anomalías restando a cada una la marcha anual media (promedio para todos los años), y luego descompuestas en patrones estandarizados mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP), a fin de establecer los principales modos de variabilidad anual. Cada patrón estandarizado fue multiplicado posteriormente por un factor de escala y sumado a la marcha anual media a fin de simplificar la visualización de los modos (positivo y negativo).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Análisis de Componentes Principales (ACP) muestra que las primeras 6 (seis) componentes explican poco más del 60% de la varianza.

La CP1 (con 15% de varianza explicada) muestra un cambio de fase que se produce en la temporada 1983-1984 (ver Fig. 1a.). A partir de allí: primaveras y veranos tienden ser más calurosos, con anomalías positivas a partir de la segunda quincena de septiembre y hacia la primera quincena de marzo (Fig. 1a y 1b). También puede notarse un leve cambio hacia inviernos más fríos.

a.



b.

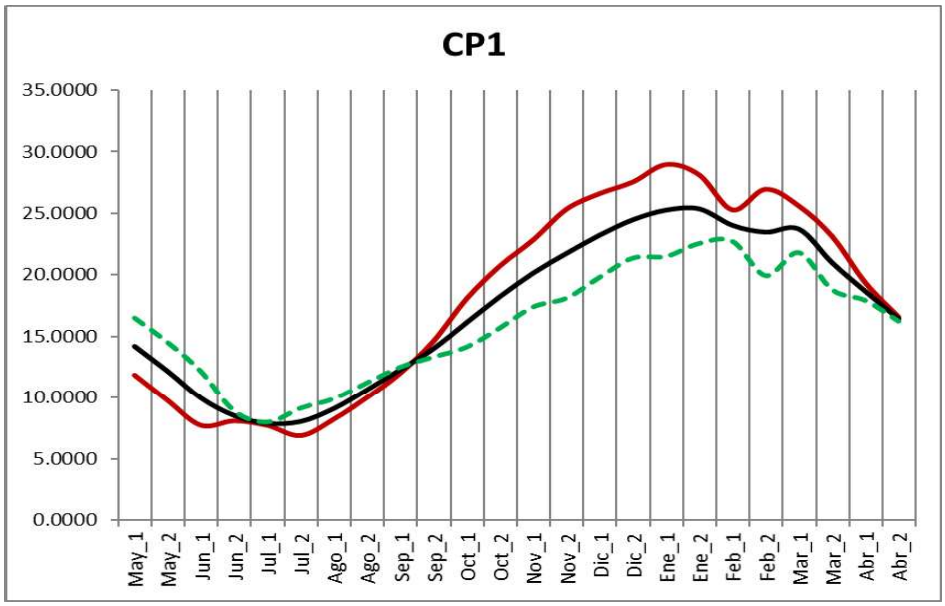
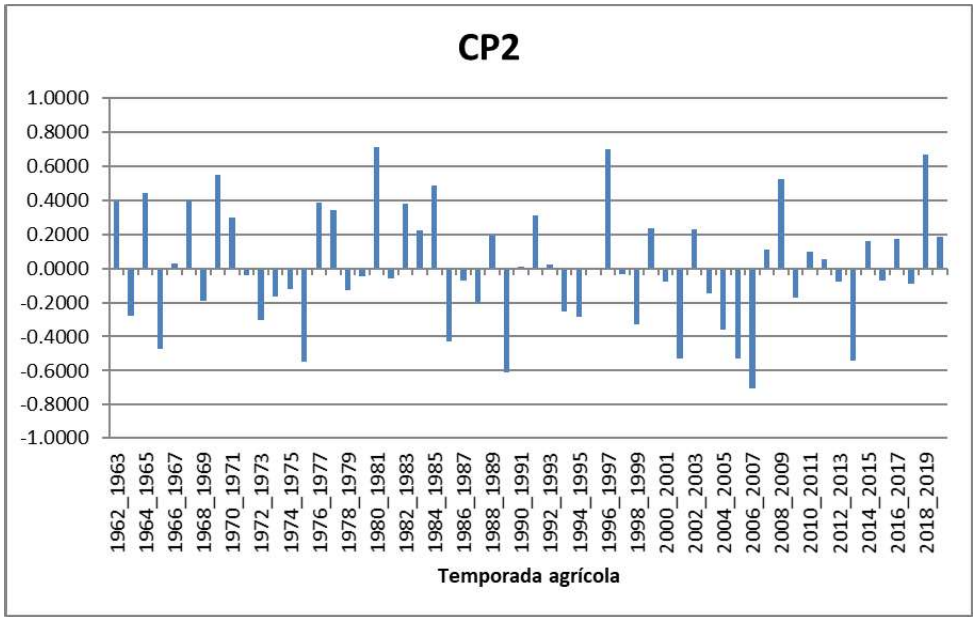


Figura 1. a. Factores de peso (component loading) correspondientes a la CP-1. **b.** Componente patrón 1 (component score 1), con modo positivo en línea roja continua y negativo en verde punteada.

En cuanto a la CP2 (11,87% de varianza explicada), la misma muestra anomalías importantes en la segunda quincena de junio y primera quincena de julio, que cambian de signo a partir de la primera quincena de septiembre y hasta la primera de octubre (Fig. 2b). También pueden observarse anomalías en el mes de enero y primera quincena de febrero; y anomalías opuestas en segunda quincena de febrero y primera quincena de abril. Para este patrón, no se observan largos períodos de años con predominancia de un modo sobre otro (Fig. 2a).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

a.



b.

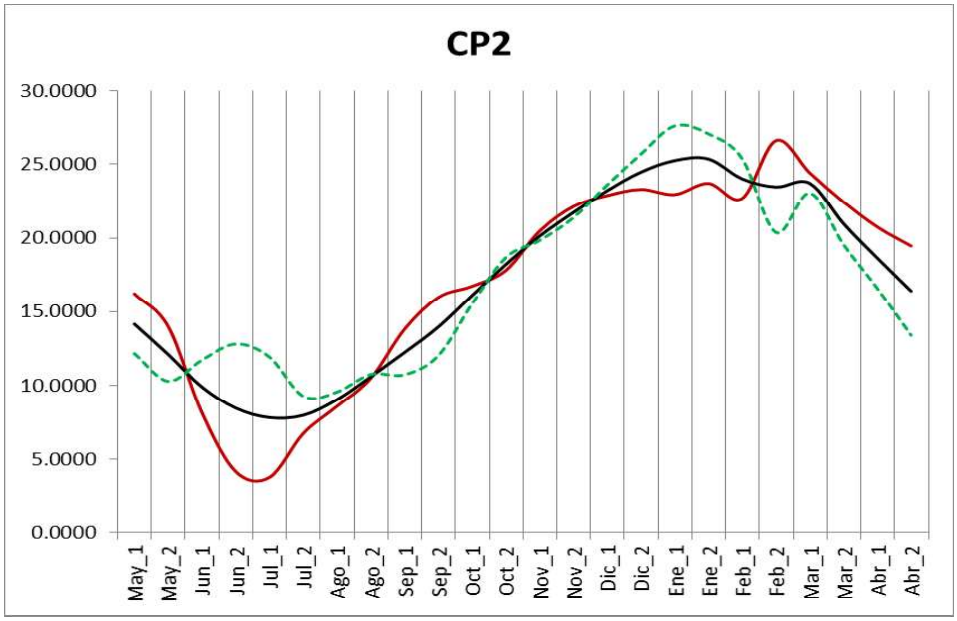
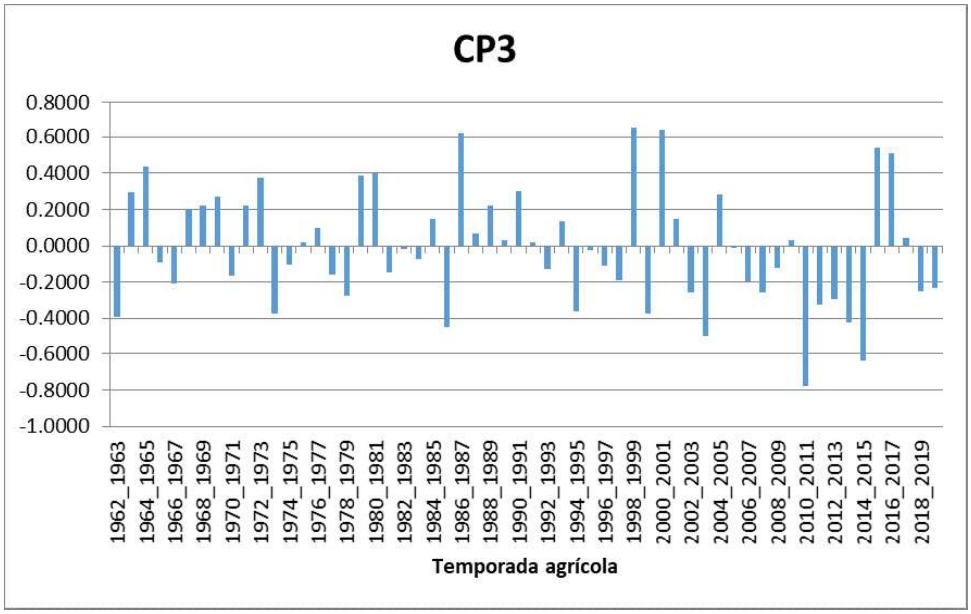


Figura 2. a. Factores de peso (component loading) correspondientes a la CP2. **b.** Componente patrón 2 (component score 2), con modo positivo en línea roja continua y negativo en verde punteada.

La CP3 (Fig. 3a y 3b) en modo positivo, con un 10,35% varianza explicada, muestra anomalías positivas en los meses de julio y agosto, anomalías negativas menos marcadas durante toda la primavera y comienzo del verano y una anomalía positiva más marcada durante el mes de febrero (viceversa para modo negativo). Este patrón tendió a presentarse con estos signos entre los años 1967 y 1973, y con signos opuestos entre 2006 y 2015.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

a.



b.

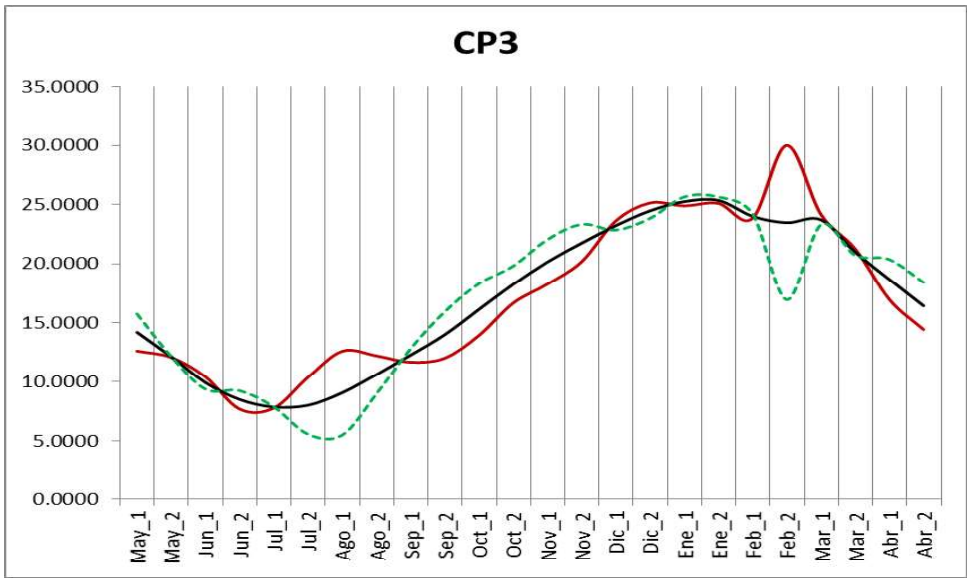
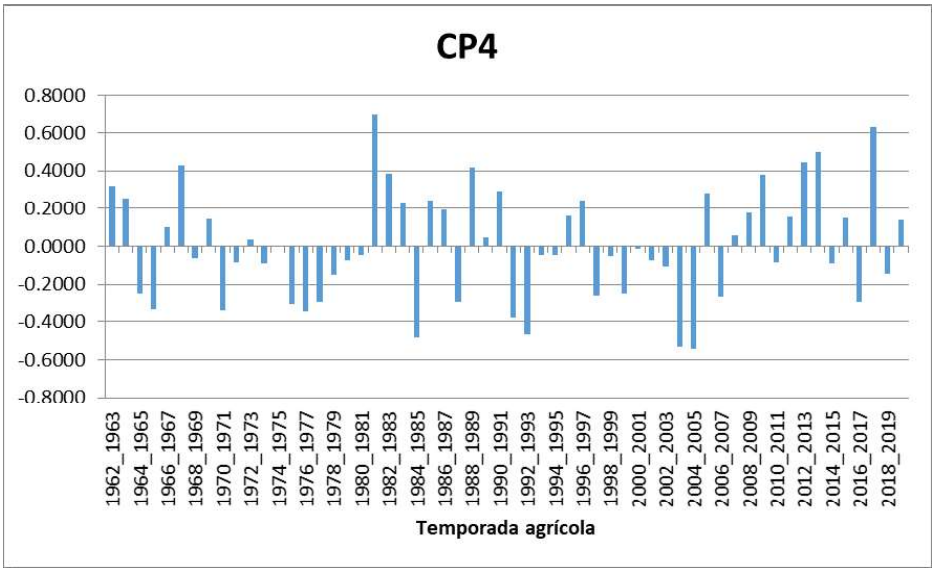


Figura 3. a. Factores de peso (component loading) correspondientes a la CP3. **b.** Componente patrón 3 (component score 3), con modo positivo en línea roja continua y negativo en verde punteada.

En el caso de la CP4 en modo positivo (mutatis mutandis para modo negativo), aquí con 8,48% varianza explicada, se observan anomalías positivas desde noviembre hasta la primera quincena de febrero, mientras que las anomalías negativas se pueden ver en invierno y mediados de la primavera (ver Fig. 4a y 4b). Se observa una predominancia de este modo a partir de 2008, y hubo una prevalencia del modo inverso en la década del '70.

a.



b.

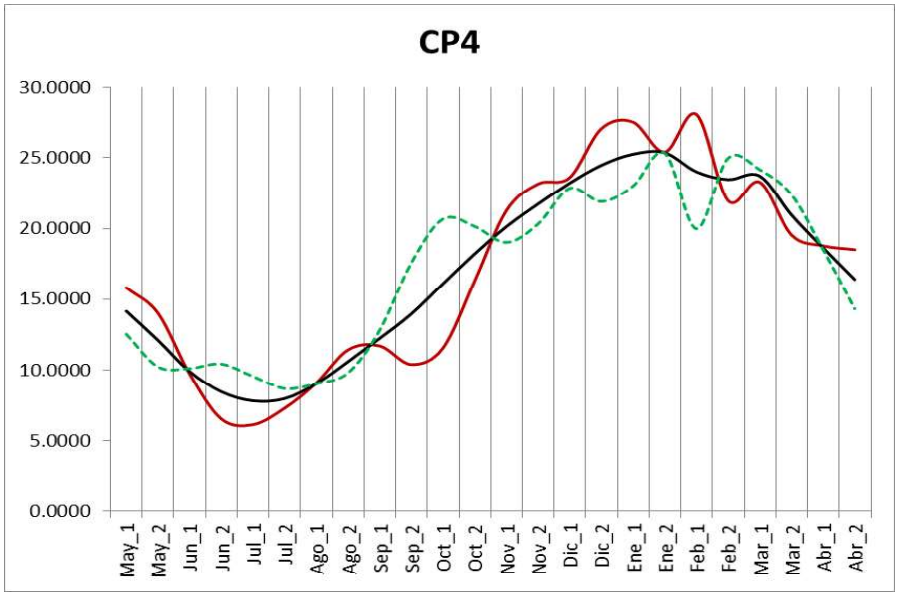


Figura 4. a. Factores de peso (component loading) correspondientes a la CP4. **b.** Componente patrón 4 (component score 4), con modo positivo en línea roja continua y negativo en verde punteada.

CONCLUSIONES

Los patrones muestran, en primer lugar, un marcado cambio de fase a partir de la temporada 1983-1984, donde se ponen de manifiesto primaveras y veranos que tienden a ser más calurosos. Tanto con febrero como septiembre con anomalías positivas, mientras que los meses de otoño y principio de invierno aparecen con anomalías negativas.

Estos patrones representan variabilidades con anomalías alternadas inter-quincenales a intermensuales, en algunos casos con predominancias de alguna fase para períodos de alrededor de 5 a 10 años.

Será entonces importante analizar las causas del cambio de fase a partir de la temporada agrícola 1983-1984, para incorporar las mismas al análisis, para luego determinar la variabilidad de la información fenológica del cultivo para establecer también patrones de variabilidad.

Las componentes (variables meteorológicas) correlacionadas significativamente con variables fenológicas, serán correlacionadas con diversas variables meteorológicas-oceánicas descriptoras de la circulación atmosférica (altura geopotencial, vector viento, función corriente, potencial de velocidad, agua precipitable, tasa de precipitación, temperatura de superficie y del aire, temperatura superficial del mar, radiación de onda larga saliente, etc.), con el fin de explorar los procesos climáticos que mayor influencia tienen sobre las variables fenológicas a través de la variabilidad anual de la temperatura local.

REFERENCIAS

Agosta, E., Canziani, P., Cavagnaro, M. Regional climate variability impacts on the annual grape yield in Mendoza, Argentina. Journal of Applied Meteorology and Climatology 51, 993 – 1009 (2012).

Deis, L., de Rosas, M. I., Malovini, E., Cavagnaro, M., Cavagnaro, J. B. Impacto del cambio climático en Mendoza. Variación climática en los últimos 50 años. Mirada desde la fisiología de la vid. Rev. FCA UNCUYO. 47(1): 67-92. ISSN impreso 0370-4661. ISSN (en línea) 1853-8665 (2015).

González Antivilo, F., Paz, R. C., Tognetti, J., Keller, M., Cavagnaro, M., Barrio, E. E., Roig Juñent, F. Winter injury to grapevine secondary phloem and cambium impairs. Budbreak, cambium activity, and yield formation. Journal of Plant Growth Regulation. Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature (2019) https://doi.org/10.1007/s00344-019-10051-w

Instituto Nacional de Vitivinicultuta. Informe anual de superficie 2021. Dirección de Estadísticas Públicas y Relaciones Internacionales. (2022). En línea: https://www.argentina.gob.ar/inv/vinos/estadisticas

Instituto Nacional de Vitivinicultuta. Informe anual de cosecha 2021. Dirección de Estadísticas Públicas y Relaciones Internacionales. (2022). En línea: https://www.argentina.gob.ar/inv/vinos/estadisticas

INTERFACE PARA LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES GUIADA POR EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

Paola Caymes Scutari[a,b], Germán Bianchini[a], Alessandro Brancolini[a]

[a] *Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo Distribuido (LICPaD), Departamento de Ingeniería en Sistemas de Información, UTN-FRM, ARGENTINA.*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), ARGENTINA*

e-mail: pcaymesscutari@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

El ambiente y los ecosistemas pueden verse fuertemente impactados y alterados por la ocurrencia de incendios forestales, buena proporción de los cuales son, lamentablemente, provocados por causas antropogénicas. La prevención y la mitigación de los incendios forestales requieren de la predicción del comportamiento de los mismos, a fin de tomar decisiones informadas para su manejo para así intentar contrarrestar los efectos negativos sobre el medio ambiente. La complejidad para lograr la predicción radica en la necesidad de detectar tempranamente el evento, en la dificultad para disponer de datos actualizados del incendio y del entorno, y en el nivel de incertidumbre relativo a la cantidad de variables necesarias para interpretar el fenómeno a través de un modelo de simulación computacional, incertidumbre fundada en la dificultad de medir los valores de las variables con exactitud, las limitaciones computacionales para su implementación, etc. En los últimos años hemos desarrollado un conjunto de métodos para la reducción de incertidumbre, los DDM-MOS (Data Driven Methods with Multiple Overlapped Solutions). Los DDM-MOS son métodos predictivos con reducción de incertidumbre, la cual consiguen realizando la predicción de la línea de fuego no en base a un único conjunto de valores de entrada, sino a múltiples combinaciones estimadas de ellos y a la agregación de las múltiples soluciones que arroja cada una de dichas combinaciones. Se trata de métodos que conjugan simulación, estadística, computación evolutiva y paralelismo. Dado la complejidad de la interrelación entre dichos elementos, en este trabajo presentamos una interface de especificación para realizar predicciones de forma transparente y automática, sin necesidad de que el usuario cuente con conocimientos específicos sobre los diferentes conceptos y temáticas que se entrelazan en los DDM-MOS. En particular, se presenta la interface para ESSIM-DE, un DDM-MOS cuyo algoritmo evolutivo para guiar la predicción es la Evolución Diferencial.

Palabras Clave: GUI, Transparencia, Sistema de Ayuda a la Decisión, Predicción, Mitigación.

INTRODUCCIÓN

La predicción de un incendio forestal consiste en determinar cómo será la propagación del fuego sobre el terreno en un instante de tiempo futuro. Generalmente, los procesos de predicción implementan modelos matemáticos, empíricos, o mixtos, que describen el comportamiento del fenómeno en cuestión a través de un simulador, que a su vez requiere como dato de entrada un grupo de variables representando aquellos factores que condicionan el comportamiento del fenómeno. La Fig. 1 ilustra este proceso de forma general. En la parte central de dicha figura se representa el simulador que implementa el modelo del fenómeno a simular (sea este matemático, empírico, o mixto). La flecha que se ubica a la izquierda de la figura representa la necesidad de contar con datos y parámetros de entrada (*input*) para el simulador, que describan el estado del entorno y

puedan utilizarse como condiciones de partida para realizar la simulación. Por su parte, la flecha que se grafica a la derecha de la figura representa la simulación que arroja como resultado (*output*) el simulador, en base a los valores de entrada y al comportamiento que con ellos describe el modelo.

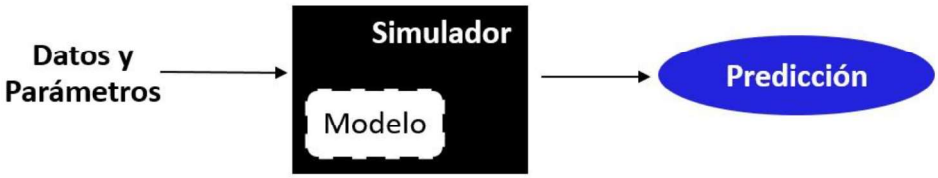


Figura 1. Esquema general del proceso de predicción basado en simulación.

En el caso particular de la predicción de incendios forestales, los datos de entrada están compuestos principalmente por la línea real de fuego y diversos parámetros o variables de entorno que describen el estado del ambiente en ese instante de tiempo (o su estimación). Entre ellas encontramos la velocidad y dirección del viento, la pendiente del terreno, el tipo de material combustible, la humedad de dicho material, etc. En la Fig. 2 se reformula la Fig. 1, explicitando los elementos que corresponden a las diferentes partes de la figura. El simulador es ahora en particular un simulador de incendios (*SI*), y el input está conformado tanto por la línea de fuego real (*LFR*) representada con una elipse, como por un vector con los parámetros antes enumerados, que se representa como un rectángulo con la etiqueta *variables de entorno*. La predicción que arroja el SI está constituida por la línea de fuego predicha (*LFP*) representada como la elipse de salida.

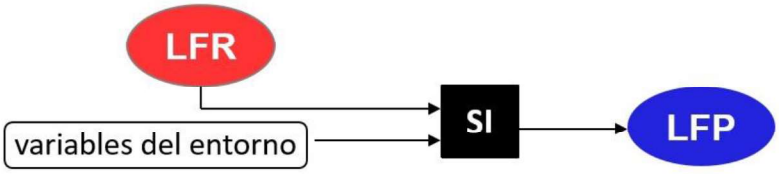


Figura 2. Esquema general del proceso de predicción de incendios forestales.

Considerando la entrada requerida por el SI, es posible observar que, lamentablemente, no es posible contar con los valores exactos para todos estos factores debido a la imposibilidad de dotar todo el territorio forestado con instrumentos de medición y, sobre todo, debido a que algunos cambian dinámicamente durante el desarrollo del propio incendio. En los primeros 45 días de 2022 se quemaron en Argentina al menos 180 mil hectáreas, sin contar los datos de la provincia de Corrientes, donde las llamas consumieron 800 mil hectáreas en el mismo período, según datos del INTA (Página12, 2022). En la Fig. 3 se muestra una instantánea durante dichos incendios en Corrientes (Télam, 2022; Página12, 2022). Este incendio constituye uno de los innumerables ejemplos que a nivel nacional e internacional ponen en relieve la necesidad de contar con herramientas de ayuda a la decisión que aceleren y orienten las estrategias de la lucha contra el fuego.



Figura 3. Lucha contra el fuego en la provincia de Corrientes, Argentina (2022). Imagen extraída de (Télam, 2022; Página12, 2022).

Durante los últimos años se ha desarrollado una serie de métodos, los denominados DDM-MOS (*Data Driven Methods with Multiple Overlapped Solutions*) (Bianchini et al, 2010), que pretenden reducir el impacto negativo que causa esta falta de conocimiento acerca del valor de las variables que describen el estado del fenómeno. En este artículo se considera el caso de aplicación de la predicción de incendios forestales, pero tales métodos podrían utilizarse para predecir otros tipos de fenómenos, como avalanchas, aludes, o inundaciones, por ejemplo. Para lograr su objetivo, los DDM-MOS conjugan una serie conceptos y técnicas algorítmicas y computacionales como las metaheurísticas, el paralelismo, la estadística y la sintonización, que colaboran de diferente manera para lograr el objetivo de arrojar una predicción aceptable en comparación con la situación real y la predicción clásica. Sin embargo, otorgan al sistema cierta complejidad para el usuario no experto en tales temáticas, pudiendo significar una restricción para su utilización. En este artículo presentamos el abordaje de una interface en la que el usuario pueda describir los elementos del problema, y a partir de los cuales automáticamente sea posible generar la predicción, sin necesidad de contar con conocimientos de programación paralela, sintonización, o metaheurísticas. En la sección siguiente se describen de forma general los elementos que componen a los DDM-MOS a fin de comprender cuál es el conjunto de elementos que se intenta abstraer en la interface. Posteriormente se focaliza en ESSIM-DE, un DDM-MOS basado en una metaheurística evolutiva denominada Evolución Diferencial (Price et al, 2005), que con ciertas características permite mejorar los resultados obtenidos para la predicción. Luego se presenta la interface desarrollada para ESSIM-DE incluyendo la descripción de sus elementos y la utilidad de los mismos, y finalmente se presentan las principales conclusiones del trabajo.

DDM-MOS: MÉTODOS CONDUCIDOS POR DATOS CON MÚLTIPLES SOLUCIONES SOLAPADAS

Los DDM-MOS (Métodos Conducidos por Datos con Múltiples Soluciones Solapadas, o *Data Driven Methods with Multiple Overlapped Solutions*) constituyen una familia de métodos que realizan la predicción, en este caso de la línea de fuego, en base a la agregación de múltiples soluciones consideradas a lo largo del proceso de predicción, como ilustra de forma general la Fig. 4. En dicha figura, la sigla *SI* representa al simulador de incendios, *LFR* representa la línea de fuego real, y *LFP* constituye la salida del sistema, o línea de fuego predicha. Al comparar esta figura con la Fig. 2 que representaba un

esquema clásico de predicción, es posible observar que la principal diferencia radica en las variables de entrada consideradas, y en tres elementos que acompañan y potencian al SI. En cuanto a las variables de entrada para los DDM-MOS, la predicción no se basa en una única combinación de valores para el conjunto de variables del entorno como sucede en la predicción clásica, sino que en paralelo se consideran múltiples combinaciones de valores, que permitan considerar al mismo tiempo posibles variaciones del entorno. En este contexto, cabe señalar que la cantidad de combinaciones posibles de valores de parámetros constituye un espacio de búsqueda de tamaño considerable, en el cual la búsqueda exhaustiva de una solución resulta prohibitiva. En consecuencia, se trabaja de forma muestral, realizándose múltiples simulaciones, cada una bajo las diferentes combinaciones de valores consideradas como entrada (en general se trata de combinaciones aleatorias). Cada combinación de valores se denomina *individuo*, *escenario*, o *posible solución*. Para cada una de dichas combinaciones, el simulador *SI* arroja un resultado generalmente diferente, y por lo tanto el sistema debe analizar todos los resultados y determinar la tendencia.

Es por ello que, en los DDM-MOS, la funcionalidad del simulador se encuentra complementada y enriquecida por metaheurísticas, estadística y paralelismo, como muestra la Fig. 4. Las metaheurísticas (Talbi, 2009) se utilizan para orientar la búsqueda dentro del gran espacio de búsqueda hacia mejores soluciones, en base a la calidad de las múltiples simulaciones obtenidas. El cómputo paralelo (Wilkinson y Allen, 2005) brinda la potencia necesaria para ejecutar las múltiples simulaciones en paralelo y acelerar el procesamiento de la información. Y la Estadística se utiliza para obtener el patrón de comportamiento de la línea de fuego en base a los resultados obtenidos en las múltiples simulaciones realizadas para los diferentes escenarios. Asimismo, algunos DDM-MOS incorporan el uso de técnicas de Sintonización (Naono et al, 2010, y Caymes-Scutari et al, 2016) a fin de mejorar su rendimiento frente a otros métodos, y en pos de brindar un resultado de mayor calidad y utilidad.

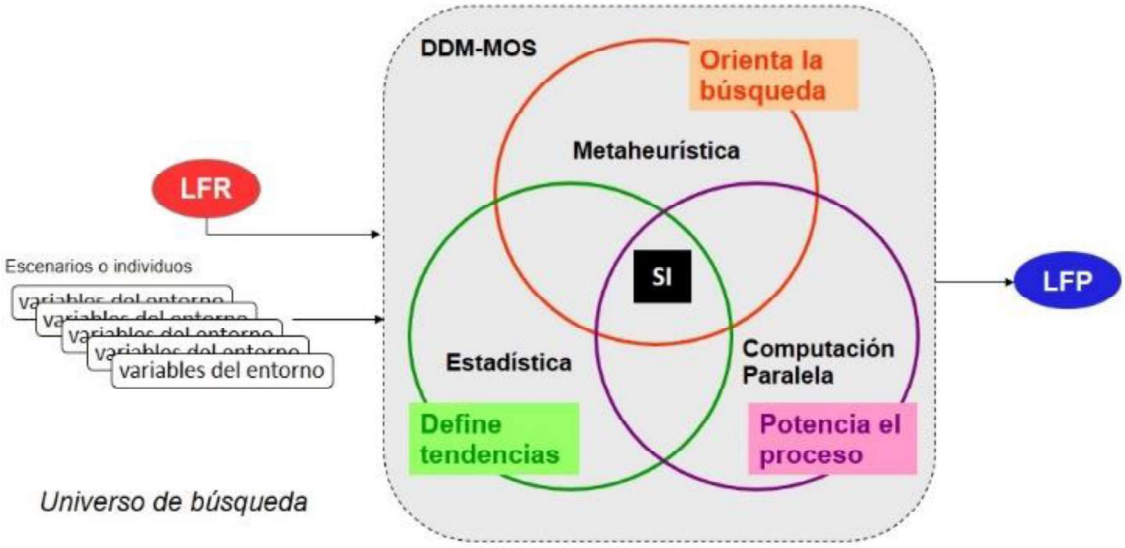


Figura 4. DDM-MOS (Métodos Conducidos por Datos con Múltiples Soluciones Solapadas)

Cada DDM-MOS se caracteriza por el nivel de utilización que posee de elementos de Estadística, Computación Evolutiva y Metaheurísticas, Paralelismo, y Sintonización, que imprimen mejoras ya sea en cuanto a calidad de predicción, tiempo de ejecución, y/o utilización de recursos. En este artículo hacemos foco en un método estadístico-evolutivo con doble jerarquía paralela, denominado ESSIM-DE. Este utiliza como metaheurística

la Evolución Diferencial (Price et al, 2005; Lampinen y Zelinka, 2000), y en la siguiente sección se describen sus características y resultados. Dado que el método conlleva una compleja interrelación de conceptos, en general no resulta sencilla la utilización directa para los usuarios, pues requieren conocimientos de computación, paralelismo, metaheurísticas, sintonización, entornos paralelos, etc.

Con el fin de simplificar el uso de este tipo de herramientas, en la subsiguiente sección presentamos una interface de especificación que actualmente estamos desarrollando a fin de hacer transparente al usuario todos los aspectos relacionados con la implementación del método, los conceptos de paralelismo, metaheurísticas, y sintonización. Dicha interface permite al usuario configurar los parámetros de las diferentes dimensiones de la herramienta, para instanciar o adaptar el comportamiento del método. Finalmente, se presentan las principales conclusiones del trabajo.

ESSIM-DE: SISTEMA ESTADÍSTICO EVOLUTIVO CON MODELO DE ISLAS Y EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

El método ESSIM-DE (por las siglas en inglés para "*Sistema Estadístico Evolutivo con Modelo de Islas y Evolución Diferencial*") pertenece a la categoría de los antes mencionados DDM-MOS, por lo que es capaz de arrojar una predicción en base a los antes mencionados tres pilares fundamentales: Análisis estadístico (para obtener patrones de comportamiento del fuego), la metaheurística Evolución Diferencial (Differential Evolution, DE o ED (Price et al, 2005), para orientar la búsqueda entre un experimento factorial de simulaciones), y Cómputo Paralelo (Wilkinson y Allen, 2005; Bianchini et al, 2010; Caymes-Scutari et al, 2016) (para acelerar el proceso de predicción y potenciar el tamaño de la muestra).

Para realizar la predicción del frente de fuego, en ESSIM-DE el desarrollo total del incendio es dividido en diferentes instantes de tiempo discretos, denominados *pasos de simulación*. Esto significa que el método trabaja con una serie de sucesivas predicciones que permiten tener un seguimiento más ajustado del fenómeno y su predicción en diferentes instantes, y a la vez calibrar o corregir la tendencia de las subsiguientes predicciones, en caso de que alguna se aleje demasiado de la situación real. En este sentido, se considera una ventana de tiempo de calibración, a fin de que el aporte realizado por la predicción en el instante *i*-ésimo sea de utilidad y enriquezca a la predicción que se realice en el instante *(i+1)*-ésimo. Dicho de otra manera, ello permite ir comparando, evaluando y ajustando la predicción a lo largo del tiempo, tomando en consideración las sucesivas líneas reales del incendio, y así lograr una predicción más ajustada a medida que el incendio se desarrolla.

Previo a la descripción general del funcionamiento de ESSIM-DE, cabe focalizar en cada uno de los tres pilares antes mencionados. El análisis estadístico, como en todo DDM-MOS, permite realizar una agregación de los resultados, en el sentido de que se superponen todas las simulaciones resultantes y en base a la frecuencia con la que se observa que cada sector del terreno (o celda) fue quemada en el conjunto total de simulaciones, se determina su probabilidad de ignición. En base a dichas probabilidades, se establece la tendencia del incendio y se predice el mapa de ignición correspondiente.

En lo que hace a Evolución Diferencial (ED o DE), constituye una metaheurística evolutiva y poblacional, que considera un conjunto o población de posibles soluciones representadas mediante vectores de parámetros. Dichos vectores, a lo largo del proceso de evolución, son sometidos a los procesos de mutación y cruzamiento, que de acuerdo a diferentes probabilidades y/o estrategias introducen cambios en los valores de los

parámetros permitiendo de esa forma avanzar en la búsqueda y explorar nuevos espacios en el dominio. Asimismo, la bondad de los vectores es evaluada de acuerdo a una función de aptitud que permite establecer el nivel de calidad de cada vector respecto de la solución esperada. En base a dicha aptitud, la población de vectores es sometida a su vez al proceso de reemplazo, por el cual se constituye una nueva población descendiente de la anterior en base a diferentes criterios que permitan establecer cuáles de los vectores serán considerados para la siguiente generación del proceso evolutivo. Esta aplicación de operadores y evaluaciones se realiza sucesivamente hasta que el algoritmo logra aproximarse a una solución de calidad aceptable. Para ESSIM-DE, la función de aptitud permite valorar qué tan acertada es cada simulación individual respecto de la situación real, y en consecuencia, cada individuo tendrá mayor o menor probabilidad de continuar en el proceso evolutivo en las iteraciones o instantes de tiempo subsiguientes. Más detalles sobre el funcionamiento de ED pueden encontrarse en (Price et al, 2005; Lampinen y Zelinka, 2000; Tardivo et al, 2017).

En cuanto al tercer pilar, dado que ESSIM-DE conlleva el cómputo de múltiples simulaciones en paralelo y requiere el análisis conjunto de los resultados, está implementado como un método paralelo, basado en un modelo Master/Worker (Wilkinson y Allen, 2005). En términos generales, el modelo Master/Worker comprende dos tipos de procesos con funcionalidades diferenciadas: el proceso master (que suele ser único), y un conjunto de procesos workers. En general, el proceso master está encargado de descomponer el dominio, coordinar la asignación de tareas a los procesos workers y la recolección de resultados, y de conjugar dichos resultados. Por su parte, la responsabilidad de los procesos workers consiste en recibir las tareas que deben procesar y devolver los resultados, sucesivamente, de acuerdo a las órdenes del proceso master. Para ESSIM-DE este modelo se organiza arquitectónicamente en base a una doble jerarquía de procesos que se organizan en islas paralelas y colaboran mediante migración (Tardivo et al, 2017), bajo la supervisión de un proceso Monitor. Esto significa que se consideran dos niveles diferentes de Master/Worker anidados. En el nivel más externo, existe un proceso Master general, el denominado *Monitor*, el cual coordina el funcionamiento de las denominadas islas (workers conceptuales del nivel más externo). Internamente, cada isla obedece al modelo Master/Worker antes descripto, donde existe un proceso master que supervisa y coordina el funcionamiento de la isla para que sus workers de isla procesen la población local a la isla. De esta forma, pueden existir varias islas en paralelo que permitan considerar diferentes poblaciones en el espacio de búsqueda, lo cual incrementa las posibilidades de exploración y de hallar resultados de mejor calidad. Con cierta regularidad definida, el Monitor supervisa el proceso denominado de migración, mediante el cual y bajo ciertas probabilidades y criterios, los diferentes masters de cada isla intercambian algunos individuos de sus respectivas poblaciones, y así enriquecen mutuamente su espacio de búsqueda. En base a las múltiples poblaciones, el proceso Monitor es también responsable de calcular y arrojar las predicciones.

Teniendo en cuenta los aspectos generales de los tres pilares que se entrelazan en ESSIM-DE, en la Fig. 5 pueden apreciarse las cuatro etapas que involucra el método. Primeramente, el proceso Master inicializa la población (*pop*), y durante la etapa de optimización (*EO*) aplica los operadores de mutación y cruzamiento de DE para generar nuevos individuos candidatos, y distribuye los individuos entre los workers. Estos utilizan el estado actual del incendio junto con un individuo para realizar la simulación y posteriormente evalúan la aptitud de la predicción obtenida, ponderando la precisión de la simulación mediante una comparación entre las celdas quemadas en el incendio real y

las celdas alcanzadas por el fuego en el mapa obtenido en la simulación. Por lo tanto, la aptitud representa el porcentaje de coincidencia entre ambos mapas. Posteriormente se lleva a cabo las subsiguientes etapas: Estadística (*EE*), de Calibración (*EC*) y de Predicción (*EP*), que recopilan la información y los resultados obtenidos por todas las islas en la etapa *EO*, y en base a ello permiten arrojar la predicción global del estado del incendio.

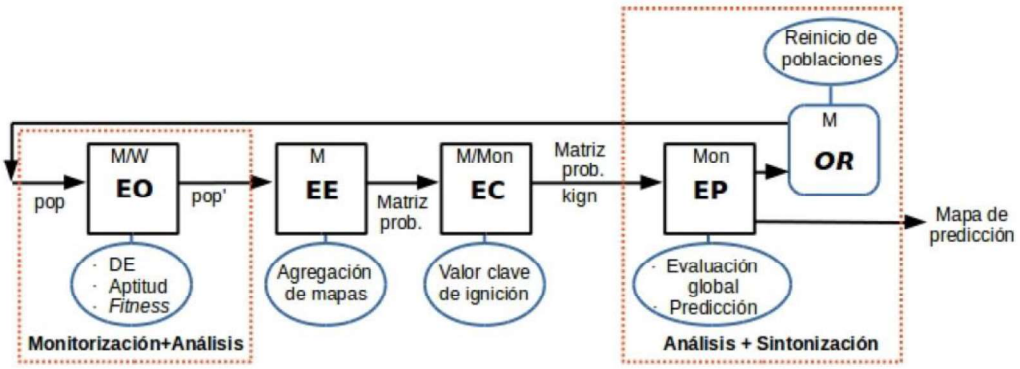


Figura 5. Esquema general de funcionamiento de ESSIM-DE.

Dado que ED presenta naturalmente condiciones que lo pueden llevar al estancamiento o a la convergencia prematura, ESSIM-DE tiene incorporada además la posibilidad de mejorar los resultados obtenidos mediante el uso de diferentes técnicas de sintonización, es decir de ajustar o mejorar los resultados para lograr una predicción más acertada y/o de una forma más rápida. Todas ellas incorporan el uso de un operador de reinicio *OR*, el cual se aplica una vez que se obtiene la predicción para el paso de simulación considerado. Este operador genera una nueva población (nuevo espacio de búsqueda), previniendo de esta manera la pronta convergencia, y garantizando la exploración del espacio de búsqueda. La sintonización puede activarse o desactivarse, y es por ello que en la Fig. 5 se representan con rectángulos en líneas de puntos las acciones relacionadas con sintonización. Para mayor detalle en el funcionamiento de las etapas de ESSIM-DE y las técnicas de sintonización es posible consultar (Tardivo et al, 2017).

INTERFACE DE ESPECIFICACIÓN PARA ESSIM-DE

Abstraer los elementos constitutivos y parametrizables del método predictivo antes descripto constituye un desafío y un paso adelante en cuanto a la amigabilidad y usabilidad de la mencionada herramienta. Los DDM-MOS constituyen herramientas de suma utilidad para guiar la toma de decisiones, sobre todo en situaciones de riesgo o catástrofe. Herramientas de este tipo no son sólo de interés desde el punto de vista informático, sino que constituyen sistemas de ayuda a la decisión que, por ejemplo, podrían ser utilizados por agentes gubernamentales, agentes ambientales, o cuerpos de bomberos a fin de anticipar y diagnosticar la evolución del fenómeno, y así prevenir incendios forestales, o bien para paliar o mitigar sus efectos negativos en el momento de la catástrofe. No obstante, los mencionados agentes serán en general usuarios no expertos en la variedad de conceptos, aspectos y técnicas que involucran los DDM-MOS, en este caso particular ESSIM-DE, y por lo tanto se hace necesario abordar el desarrollo de una interface que haga transparentes todos los detalles de implementación: aspectos de programación paralela, herramientas, rendimiento, análisis, sintonización, y entornos de ejecución (Caymes-Scutari et al, 2016). En esta sección describimos una interface de especificación que haga transparente para el usuario los aspectos de implementación y sintonización inherentes al sistema subyacente.

En el diseño de la interface se tienen en cuenta los diferentes elementos del par problema-solución que se interrelacionan en los distintos métodos, y para cada uno en particular, los cuales se condensan en diferentes pestañas. De esta forma, se contempla una pestaña para determinar los valores de entrada, parámetros, y/o criterios funcionales para la metaheurística correspondiente (tamaño de cada población, probabilidades para los operadores, etc.), otra pestaña para definir los valores relacionados con la jerarquía paralela (cantidad de islas a utilizar, configuración del entorno de ejecución existente, etc.), otra pestaña para configurar los parámetros propios del simulador en cuestión (características del viento, del terreno, inclinación, tipo de vegetación, etc., que constituirían la entrada para SI en las Fig. 1, 2 y 4), una pestaña con finalidades de documentación (descripción del problema y/o el experimento a realizar, nombre deseado para el programa generado, etc.), y una pestaña para habilitar opciones de sintonización dinámica, ya que ESSIM-DE permite distintos niveles de sintonización.

Con fines ilustrativos, en la Fig. 6 puede observarse la interface gráfica de usuario (GUI) para la especificación de instancias de ESSIM-DE. Nos referimos a 'instancias', dado que a través de las diferentes combinaciones de parámetros o configuraciones que el usuario defina sobre los distintos campos, opciones, o elecciones que ofrece la especificación, se obtendrá una instancia diferente y particular, que influirá en el desempeño dinámico del sistema, y consecuentemente en la calidad de los resultados finales obtenidos. La interface está implementada en Java, dada su portabilidad, y, como se mencionó anteriormente, provee varias pestañas (tabs) en las que los elementos del par problema-solución se encuentran organizados de acuerdo a su interrelación y naturaleza. En la Fig. 6 es posible distinguir seis pestañas: *Problem Description, Execution Environment, Fire Parameters, Differential Evolution, ESSIM Parameters,* y *Tuning*. En particular, en la figura se encuentra activa la pestaña "*Execution Environment*". Dicha pestaña condensa los parámetros relacionados con los recursos computacionales disponibles en el sistema de ejecución subyacente, como cantidad de nodos, nombre de los mismos, y forma lógica de organizarlos: cantidad de islas y cantidad de workers por isla. La interface contempla ayudas y sugerencias para asistir al usuario en el proceso de configuración de parámetros y operadores de ED sin la necesidad de que el usuario tenga conocimientos específicos relacionados con lenguajes de especificación, lenguajes de programación, paradigma paralelo, e incluso sin conocer la apariencia del código paralelo y sintonizable que será generado automáticamente por la aplicación. Para la mayoría de los parámetros y operadores, la interface provee valores o definiciones por defecto que facilitan y guían las elecciones del usuario, sobre todo durante los primeros pasos. En el caso particular de ESSIM-DE, algunos de los parámetros a especificar son: el tipo de mutación, el de cruzamiento y el de reemplazo, el tamaño de la población, la condición de terminación, los parámetros del simulador de incendios, los parámetros de sintonización que pueden activarse o desactivarse, entre otros. Una vez que el usuario completa los campos de la especificación, la GUI automáticamente genera una especificación XML formal. En base a dicha especificación, un módulo de traducción/instanciación será el responsable de utilizar las entidades especificadas en el archivo XML para generar y completar todos los parámetros del esqueleto de ESSIM-DE. Todo el proceso es realizado de forma automática y transparente al usuario, que sólo debe cooperar en la configuración y descripción de los parámetros.

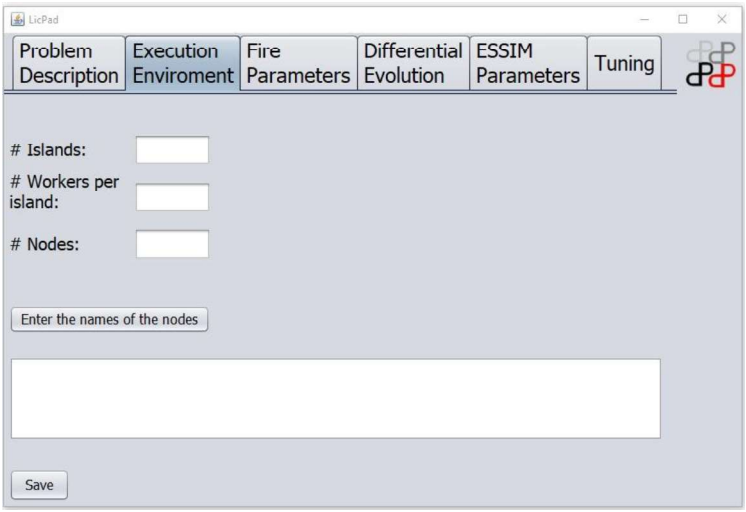


Figura 6. Aspecto general de una de las pestañas de la GUI.

Para el desarrollo de la interface se utiliza Apache NetBeans (Apache, 2021), y se utiliza Jakarta XML Binding (Jakarta EE, 2021; Jakarta XML, 2021) como librería para el manejo y navegación de documentos XML y objetos Java (JDK, 2021). Se ha optado por utilizar Apache NetBeans dado que proporciona herramientas potentes e inmediatas para el desarrollo de GUIs. Dado que soporta Java, cuenta con un gran número de recursos, entre los que cabe mencionar la librería jakarta.xml.bind que permite automatizar el mapeo entre objetos java y documentos XML. Al trabajar de este modo, se pretende alcanzar los dos objetivos principales que nos hemos fijado: proporcionar al usuario un entorno fácil de utilizar, y convertir los datos introducidos manualmente en un formato legible, recuperable, y navegable automáticamente para completar el esqueleto del método subyacente de acuerdo a las elecciones y necesidades del usuario.

CONCLUSIONES

El método predictivo ESSIM-DE constituye un método de reducción de incertidumbre que permite realizar predicciones aproximadas de fenómenos de propagación, y en particular de incendios forestales, dando como respuesta resultados de suficiente calidad como para que sean aceptables. Sin embargo, alcanzar esa calidad aceptable podría demandar un esfuerzo considerable para el usuario final en caso de que no sea experto en programación, computación paralela, metaheurísticas, y/o sintonización. En este artículo proponemos una interface de especificación para un uso más amigable de ESSIM-DE, para el cual se presenta un prototipo. El desarrollo de esta interface constituye un desafío adicional para hacer de estos métodos herramientas útiles para la prevención y la mitigación de incendios forestales. Con herramientas de este tipo, que permitan encapsular la metodología predictiva subyacente y hacer transparente al usuario los conceptos atinentes a las diferentes temáticas que se conjugan en ESSIM-DE, constituye una importante ventaja, sobre todo a la hora de brindar un soporte de ayuda a la toma de decisiones, pues no requiere conocimientos específicos de programación, paralelismo, metaheurísticas o sintonización. De esta manera, el método contempla la posibilidad de utilizar métodos complejos para conseguir predicciones precisas y eficientes, a partir de una herramienta amigable y sencilla, que conduce el método a partir de una especificación descriptiva del caso que se debe resolver.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONICET, UTN y FONCyT, por el soporte para la realización de este trabajo (proyectos SIUTIME0007840TC, TEUTIME0007658TC, y UUMM-2019-00042).

REFERENCIAS

Bianchini, G., Denham, M., Cortés, A., Margalef, T., Luque, E. Wildland Fire Growth Prediction Method Based on Multiple Overlapping Solution. Journal of Computational Science Vol 1 Issue 4, pp. 229-237. Elsevier. (2010).

Caymes-Scutari, P., Bianchini, G., Sikora, A., Margalef, T. Environment for Automatic Development and Tuning of Parallel Applications. HPCS 2016, International Workshop on Parallel Optimization using/for Multi and Many-core High Performance Computing, Innsbruck, Austria. pp. 743-750. IEEE. (2016).

Lampinen, J. y Zelinka, I. On the Stagnation of the Differential Evolution algorithm. I.C. Soft Computing, pp. 76-83. (2000).

Naono, K., Teranishi, K., Cavazos, J. y Suda, R. Software Automatic Tuning: From Concepts to State-of-the-Art Results, Springer, New York. (2010).

Price K., Storn R., Lampinen J. Differential Evolution - A practical approach to global optimization. Springer-Verlag New York, Inc. (2005).

Talbi, E. Metaheuristics: From Design to Implementation. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. (2009).

Tardivo, M.L., Caymes-Scutari, P., Méndez-Garabetti, M. y Bianchini, G. Optimization for an Uncertainty Reduction Method Applied to Forest Fires Spread Prediction. Computer Science – Cacic 2017, pp. 13-23. Springer. (2017).

Wilkinson, B., Allen, M. Parallel Programming: Techniques and Applications Using Networked Workstations and Parallel Computers. Pearson Prentice Hall. (2005).

Apache NetBeans 11.1. https://netbeans.apache.org/download/nb111/index.htm. Accedido en junio de 2021.

JDK 13 Documentation – Home. https://docs.oracle.com/en/java/javase/13/ Accedido en junio de 2021.

Jakarta EE. The Eclipse Fundation. https://jakarta.ee/resources/#documentation Accedido en junio de 2021.

Jakarta XML Binding 3.0. The Eclipse Fundation. https://jakarta.ee/specifications/xml-binding/3.0d/ Accedido en junio de 2021.

Página12. https://www.pagina12.com.ar/403434-incendios-en-argentina-en-los-primeros-dos-meses-de-2022-ya-#:~:text=La%20cifra%20es%20abrumadora%3A%20en,verdadero%20drama%20en%20la%20regi%C3%B3n

Télam (https://www.telam.com.ar/), a través de Página12.

CARACTERIZACIÓN GRAVIMÉTRICA DEL PROYECTO MINERO DE ARROYO VERDE

Andrés Costa [a], Bahía Marcos E.[a,b], Nicolás Scivetti [c], Cecilia Pavón Pivetta [b,d], Leonardo Benedini [b,d]

[a] *Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA*
[b] *Instituto Geológico del Sur – CONICET – ARGENTINA*
[c] *Instituto Patagónico de Geología y Paleontología – IPGP–CENPAT–CONICET), Puerto Madryn, Argentina*
[d] *Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA*

e-mail: andres_costa96@hotmail.com

RESUMEN

El área de trabajo presenta 22 km^2 y se ubica al este del límite entre las provincias de Río Negro y Chubut. Su estudio es fundamental para comprender el origen y la evolución del registro geológico del Jurásico debido a los afloramientos volcánicos bien establecidos en los márgenes del Arroyo Verde. Por otro lado, presenta una elevada importancia económica ya que cuenta con un proyecto minero de oro y plata. Las perforaciones incluidas en el proyecto interceptan las vetas de mineralización así como también el contacto entre el basamento y las rocas volcánicas de la Formación Marifil. La sucesión volcánica del Jurásico se emplaza sobre una falla geológica de orientaciones E-O y NE-SO desarrolladas en la Formación El Jagüelito (metamorfitas de bajo grado) y comprende depósitos efusivos e ignimbríticas de diferentes características. En este trabajo se utiliza el método gravimétrico, el cual se basa en la medición de fluctuaciones en el campo gravitatorio terrestre causadas por variaciones laterales de densidad en el subsuelo. Se describe el flujo de trabajo que implica el procesamiento de datos gravimétricos: las correcciones involucradas, el grillado y la confección de mapas de isoanómalas. y la separación del efecto gravimétrico regional del residual mediante diferentes técnicas. Por último, se realizaron dos modelos estructurales gravimétricos 2D a lo largo de dos perfiles estratégicamente trazados. De esta manera, el análisis del campo gravitatorio terrestre nos permite reconocer la geometría del basamento y la configuración de los depósitos jurásicos en la zona de estudio.

Palabras Clave: Método gravimétrico, Región Norpatagónica, Modelado.

INTRODUCCIÓN

La gravimetría es un método geofísico clásicamente utilizado con el fin de detectar las variaciones laterales de densidades en las unidades geológicas presentes en el subsuelo. En este trabajo, se presenta la aplicación del método gravimétrico en un área perteneciente a un proyecto minero en la localidad de Arroyo Verde, Chubut, Argentina.

Debido a la no unicidad de los campos potenciales, no existe un único modelo que ajuste los datos observados, con lo cual es fundamental el conocimiento de la geología y otras fuentes de información para disminuir la incertidumbre. En tal sentido, se utilizó un conjunto de datos de pozo pertenecientes a la empresa Portal Resouces Ltd., así como también información geológica y modelos estructurales para acotar las soluciones. El objetivo de este trabajo consiste en la realización de modelos 2D del subsuelo, que permitan determinar la configuración estructural de las unidades características del área de estudio y caracterizar al cuerpo ígneo intrusivo situado en el área de estudio.

MARCO GEOLÓGICO

El área de trabajo incorpora el borde sureste de la región norpatagónica (Fig. 1), que limita al norte con las cuencas Neuquina y Salado, al sur con la cuenca del Golfo San Jorge y al oeste con la precordillera patagónica. Está formada por rocas ígneas metamórficas, sedimentos del Eopaleozoico, volcanitas y piroclastitas del Mesozoico. Las rocas sedimentarias marinas terciarias y el volcanismo basal de la misma edad también estuvieron involucrados, pero en menor medida.

El basamento precámbrico-cámbrico de la región está constituido por una secuencia metasedímentaria de metamorfitas de bajo grado, principalmente pelitas y margas (asociadas a ambiente marino) pertenecientes a la Formación El Jagüelito. Durante el período Jurásico, una gran cantidad de volcanes en su mayoría silíceos dieron lugar a la Formación Marifil o Complejo Marifil. Hacia el oeste, con una discrepancia angular, se deposita en las rocas volcánicas, sedimentos y tobas continentales del Grupo Chubut del Cretácico Superior y luego en los sedimentos del Terciario de la Formación La Colonia. Unos kilómetros al SE está cubierto por sedimentos marinos de la Formación Arroyo Verde, perteneciente originalmente al Paleoceno y posteriormente al Eoceno. El periodo del Cuaternario está representado por depósitos fluvioglaciares, aluviales y coaluviales.

Estratigrafía

El área de estudio fue descrita, en primer lugar, por Malvicini y Llambías (1974). Éstos definieron a la Formación Marifil y le atribuyeron una litología compuesta por riolitas silicificadas, ignimbritas y riolitas intrusivas apoyadas sobre andesitas. En un estudio posterior, cerca del área del proyecto Arroyo Verde, se caracterizó a la Brecha Salina Chica del Triásico Tardío (Cortés, 1981). Este autor la describe como una brecha de origen piroclástico que se encuentra muy fragmentada y alterada. Por encima de éstas se puede observar el conjunto de lavas, piroclastitas y rocas subvolcanicas que Malvicini y Llambías (1974) denominaron Formación Marifil, y la cual Cortes (1981) la redefinió como Complejo al diferenciarla en tres unidades:

- Fm Puesto Piris: Es la unidad basal sedimentario. Está compuesta por conglomerados, y areniscas de ambientes de alta energía. Presenta abundantes depósitos de carbonatos (calizas continentales).
- Fm Aguada Bagual: Comprende la mayor parte de los depósitos piroclásticos. Las ignimbritas tienen composición dasítica, riolítica y también presenta domos y lavas de composición riolítica y menores depósitos sedimentarios.
- Fm La Porfía: Es la unidad superior. Está compuesta por domos, diques y lavas riolítica.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

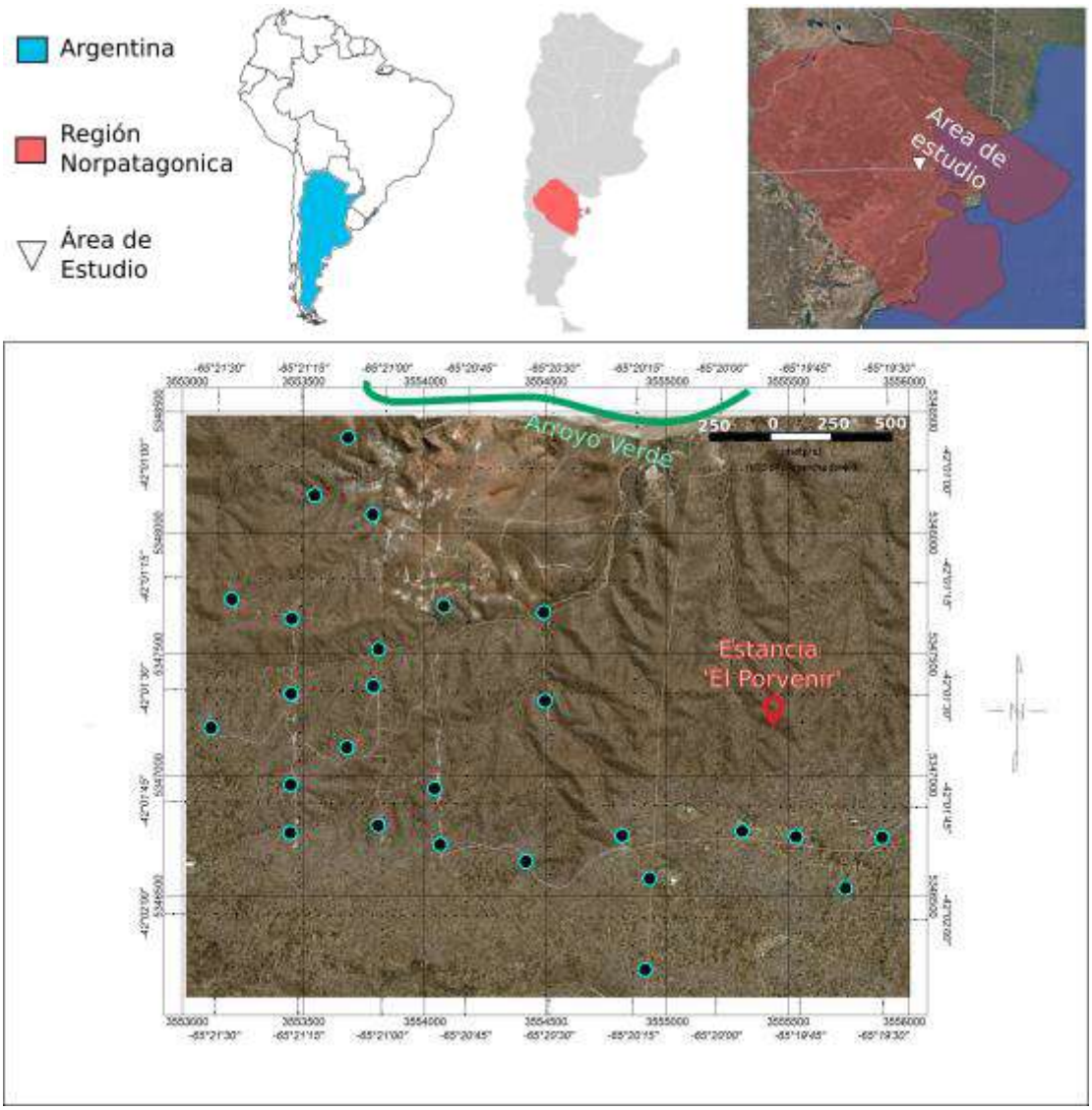


Figura 1. Ubicación del área de estudio y distribución de las estaciones realizadas (círculos negros).

ADQUISICIÓN DEL DATO Y OBTENCIÓN DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER

Se procesaron e interpretaron 26 mediciones topográficas y de gravedad terrestre (Figs. 1 y 2). Cada estación está separada aproximadamente por 0,31 km, por caminos y rutas disponibles, cubriendo un área de 7,22 km^2, que se extiende entre 42° 2' 10.76" S y 42° 0' 52.93" S, y 65°21' 36.47" O y 65° 19' 25.48" O. Los datos gravimétricos fueron adquiridos con un gravímetro Lacoste & Romberg que cuenta con una precisión de 0.01 mGal. Además, en cada estación se midieron las coordenadas geográficas y la altimetría con equipos de GPS.

Al dato obtenido se le realizaron las reducciones gravimétricas, que incluyen: corrección de la deriva instrumental, corrección de latitud, corrección de Aire Libre y corrección de Bouguer. Para cada estación se calcularon las anomalías de Bouguer utilizando las expresiones descritas por Blakely (1996) y Hinze et al. (2005), con una constante de 0,3086 mGal/m^3 para la corrección de Aire Libre, y un valor de densidad de reducción de 2,67 g/cm^3 para Bouguer. Finalmente, se obtuvo el mapa de anomalías de Bouguer (AB) mediante el software Oasis Montaj (Fig. 2).

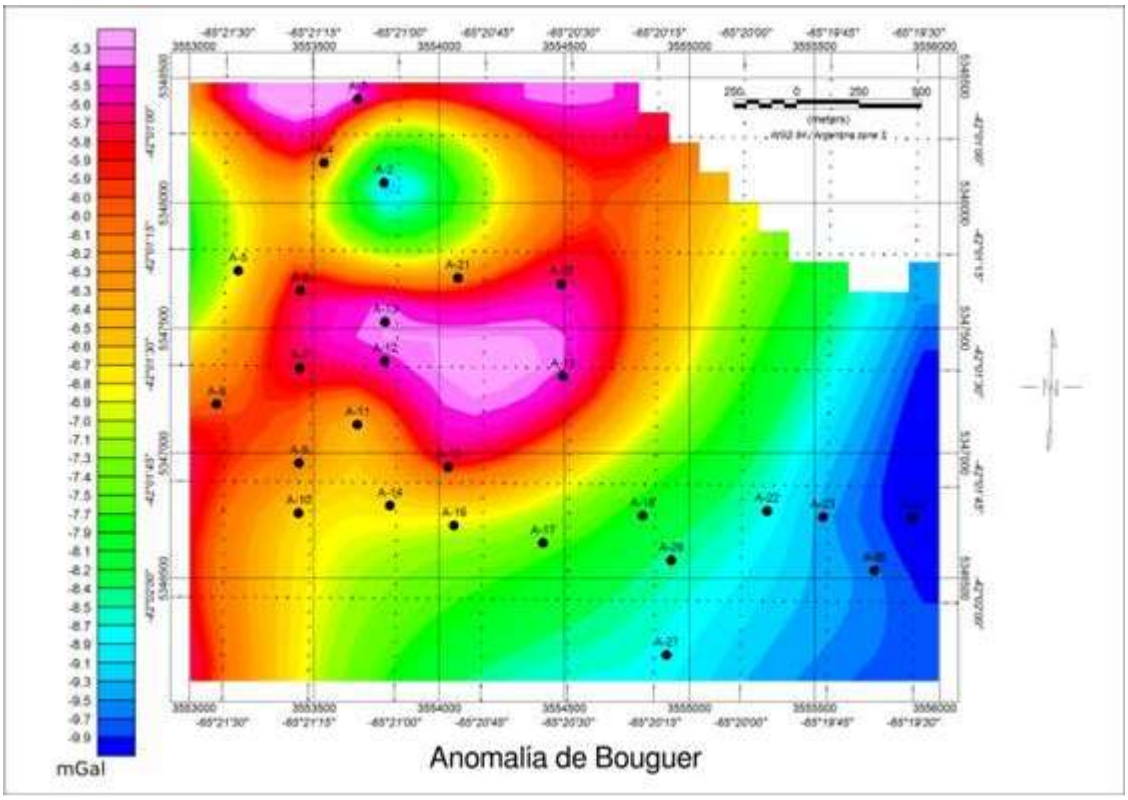


Figura 2. Mapa de anomalía de Bouguer obtenido en el área de estudio. Puntos negros: estaciones de medición.

En la Figura 2 se puede ver que los valores anómalos en la zona de estudio se encuentran en un rango entre 5.3 y -0.9 mGal, aproximadamente, y en general aumentan desde el sureste hacia el noroeste. Asimismo, se observa un bajo en la zona del pozo A-2 y un alto en la zona central del mapa.

Separación de componentes regional-residual

El campo de anomalías de Bouguer (Fig. 2) contiene información proveniente de estructuras geológicas profundas (campo regional), y someras (campo residual o local) debido a estratos geológicos con mayor o menor densidad que las rocas circundantes (Ecuación 1). La separación de estos efectos es indispensable para la interpretación de los mismos, ya que la componente regional podría enmascarar las respuestas producidas por las fuentes superficiales (Bahía et al., 2020). Con la finalidad de caracterizar mejor al cuerpo ígneo de nuestro interés se decidió llevar a cabo este procedimiento.

$$\mathrm{AB} = \mathrm{AB}_{Regional} + AB_{Residual} \quad (1)$$

Para llevar a cabo esta separación hay muchos métodos efectivos. En este trabajo se probaron la separación mediante filtros según número de onda (utilizando un filtro Butterworth y la continuación analítica ascendente) y también la separación mediante el uso de ajustes polinomiales (de primer y segundo orden). Finalmente, debido a que mostró mejores resultados, se optó por el filtro de continuación ascendente.

El proceso de la continuación analítica ascendente (Blakely, 1996) consiste en llevar la información obtenida para un plano de referencia (z = 0) a un plano superior situado a una determinada altura h. Al aplicar este procedimiento las anomalías de los objetos

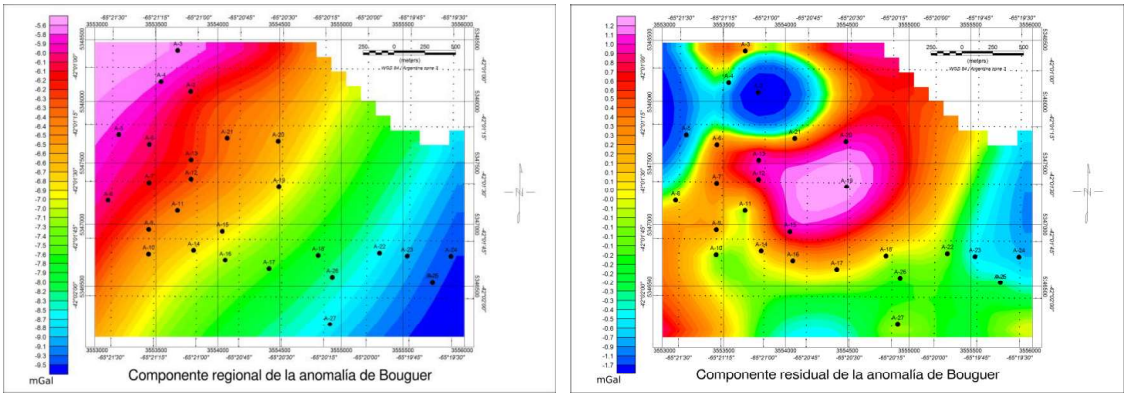
pequeños y que yacen a poca profundidad decrecen con mayor rapidez que las anomalías de masas de mayor tamaño y profundidad. Este procedimiento puede pensarse como un "enfoque" (conservándose lo general y perdiéndose el detalle del campo).
En el dominio de frecuencia este filtro tiene la forma:

$$\mathrm{H}(\mathrm{K}_x; K_y) = e^{h \cdot \sqrt{K_x^2 + K_y^2}} \tag{2}$$

Donde K_x y K_y son las componentes x e y, respectivamente, del número de onda, y h es la altura del plano superior (también llamada "altura de continuación").
Con el fin de analizar el comportamiento del campo gravitatorio a diferentes alturas, se realizaron varias pruebas con diferentes valores de h y se eligió una altura de 510.2 m. Esta altura es la que mejor representa a la componente regional (Fig. 3a). De la Ecuación 1, despejando la componente residual se obtiene:

$$\mathrm{AB}_{Residual} = AB - AB_{Regional} \tag{3}$$

Así, una vez obtenida la componente regional, substrayendo dicha componente del mapa de anomalía de Bouguer (Fig. 2) se obtuvo la componente residual (Fig. 3b).



(a) (b)

Figura 3. a. Mapa de componente regional de la AB. **b.** Mapa de componente residual de la AB.

A partir del mapa de la componente residual de la AB, se determinó la presencia de dos anomalías características dentro del área de estudio (BG y AG en Fig. 4).

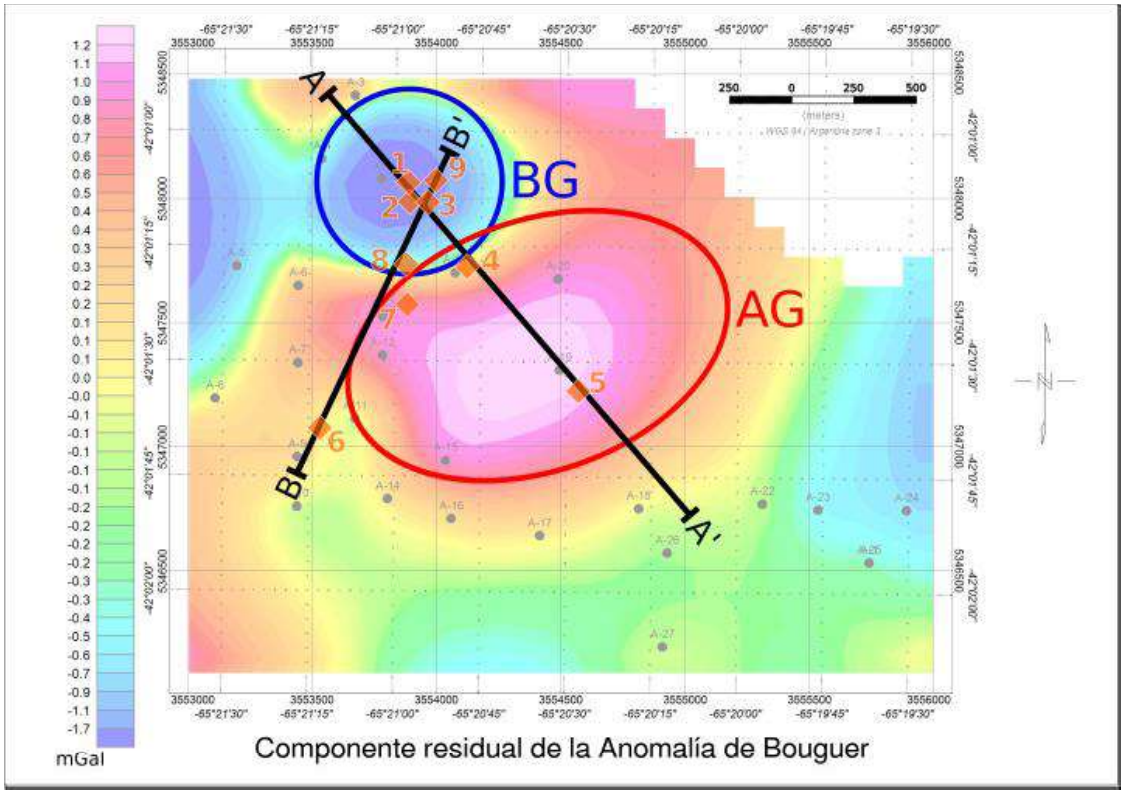


Figura 4. Mapa de la componente residual de la AB. En negro se muestran la ubicación de los perfiles elegidos para la realización de los modelos 2D. En amarillo se localizan los pozos utilizados en dichos modelos.

El bajo gravimétrico (BG) está situado en el sector noroeste del área (estaciones A-2 y A-4), presenta una forma circular con un diámetro de 400 m y un rango de valores que van desde -0.2 a -1.7 mGal. Por su parte, el alto gravimétrico (AG) se encuentra ubicado en el centro del mapa de la componente residual (estaciones A-12, A-13, A-15, A-19 y A-20) y presenta un rango de valores que van desde 0.5 mGal a 1.2 mGal. A diferencia del BG, el AG tiene una forma elíptica con orientación SO-NE y con un área de 4.55 km^2.

MODELADOS 2D Y DISCUSIÓN

Con el fin de obtener información cuantitativa acerca de las fuentes causantes (geometría, dimensiones y profundidad) de las anomalías gravimétricas, se realizaron modelos 2D sobre la componente residual de Bouguer. Cuando el corte geológico se extiende sin variación en la dirección perpendicular, el proceso se describe como modelado bidimensional (2D), siendo una aproximación matemática muy útil y de bajo costo computacional (Bahía et al., 2021).

Dada la curva de componente residual de la AB obtenida a partir de las mediciones realizadas en el campo (curva observada), es posible realizar muchos modelos que generen diferentes curvas (curva calculada) que se ajusten a la curva observada con un error aceptable. Esta ambigüedad genera un problema al momento de proponer un modelo que se ajuste con la curva observada. Si bien existen infinitas combinaciones de parámetros físicos y geométricos que pueden ajustar los datos observados, el conocimiento de la geología y el uso de datos de pozo permite poner restricciones a los modelos y por lo tanto disminuir la incertidumbre. En tal sentido y para intentar resolver el problema de ambigüedad, se hizo uso de una serie de datos de pozo, provistos por la empresa Portal Resources Ltd., que limitan el número de modelos que se pueden

proponer, dado que éstos fijan los límites entre las capas del modelo a determinadas profundidades. Además, se utilizaron modelos estructurales para agregarle coherencia geológica a los modelos realizados.
Los modelos se elaboraron con el programa GM-SYS de Oasis montaj. Los cálculos están basados en las expresiones obtenidas por Talwani et al. (1959) y el algoritmo propuesto por Won y Bevis (1987).
Se realizaron dos modelos 2D a partir de dos perfiles (A-A' y B-B' en la Figura 4), uno con orientación NO-SE y otro con orientación SO-NE. Para cada uno de los modelos se propusieron tres capas: un basamento cámbrico con densidad de 2.72 gr/cm^3, un domo riolítico de edad Jurásica Media y densidad 2.40 gr/cm^3, y una cubierta terciaria de densidad 2.30 g/cm^3. Las densidades para cada una de estas capas se obtuvieron a partir de muestras de rocas en el laboratorio e información geológica provista por la empresa Portal Resources Ltd.

Modelo A

El modelo A (Figura 5) se realizó sobre el perfil A-A' (Figura 4) que se extiende en dirección NO-SE con una longitud de 2,23 km. Atraviesa los pozos P1, P2, P3, P4 y P5.
La sección cruza al NE un bajo gravimétrico que se interpreta como un aumento en la profundidad del basamento y la presencia de un domo riolítico de menor densidad. Esta interpretación se fundamenta a partir de la información de las profundidades del basamento y del domo provistas por los pozos P1, P2 y P3. En este sector, el basamento alcanza una profundidad de 238 m. Asimismo, en la zona del pozo P1 el domo se encuentra aflorante.
Luego, hacia el SE, se interpreta que el domo se encuentra emplazado en un conjunto de fallas normales. Este conjunto de fallas normales, daría como resultado un sistema de horst y grabens que generaron una disminución de la profundidad del basamento, dando lugar al alto gravimétrico (AG), ubicado al SE del domo. Esta interpretación se sustenta en la información de la profundidad del basamento en los pozos P4 y P5.
Con esta interpretación se obtuvo una curva teórica de anomalía residual con un error medio cuadrático de 0.542 mGal respecto de aquella curva obtenida mediante mediciones en campo.

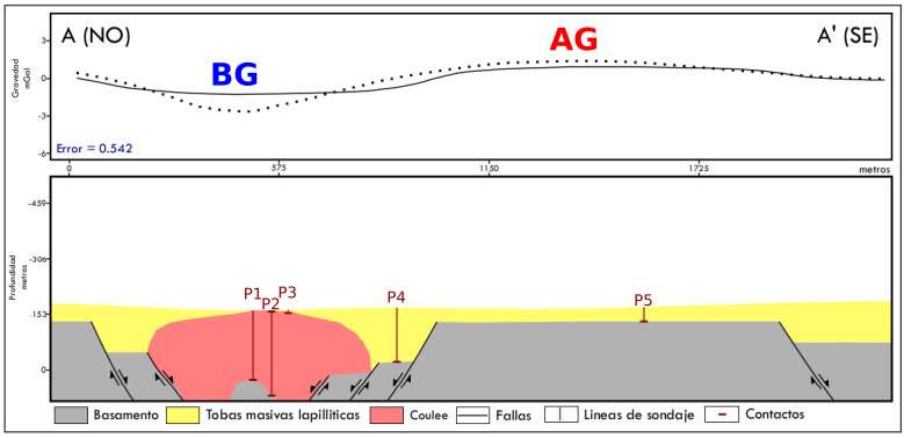


Figura 5. Modelo 2D realizado sobre el perfil A-A' representado en la Fig. 4. Arriba: anomalía observada (línea negra punteada) y calculada (línea negra continua); abajo: modelo propuesto.

Modelo B

El modelo B (Figura 5) se realizó sobre el perfil B-B' (Figura 4) que se extiende en dirección SO-NE con una longitud de 1,31 km. Atraviesa los pozos P6, P7, P8, P2, P3 y P9.
Al SO, los valores anómalos aumentan progresivamente hacia el NE, dando lugar al alto gravimétrico AG. Este aumento progresivo en la componente residual se interpreta como una disminución de la profundidad del basamento hacia el NE.

Hacia el NE, el valor anómalo disminuye generando el bajo gravimétrico BG. Éste se interpreta, al igual que en el modelo A y utilizando la información de los pozos P2, P3 y P9, como un aumento en la profundidad del basamento y la presencia del domo riolítico, emplazado hacia el SO a través de fallas normales.
Con esta interpretación se obtuvo una curva teórica de anomalía residual con un error de 0.493 mGal respecto de la obtenida mediante mediciones en campo.

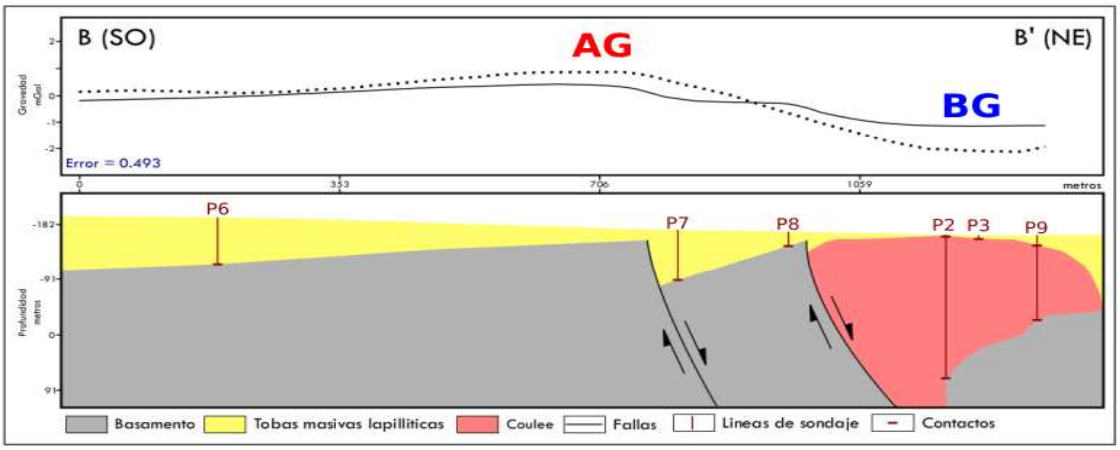


Figura 6. Modelo 2D realizado sobre el perfil B-B' representado en la Fig. 4. Arriba: anomalía observada (línea negra punteada) y calculada (línea negra continua); abajo: modelo propuesto.

CONCLUSIONES

Se logró realizar de manera satisfactoria las tres etapas involucradas en el método gravimétrico de exploración: adquisición, procesamiento e interpretación. A partir de la reducción gravimétrica y la separación de componentes regional y residual de la anomalía de Bouguer se obtuvo una primera imagen de la geometría del subsuelo del área de estudio y se observaron sus patrones anómalos más característicos. De esta manera se definieron un bajo gravimétrico (BG) y un alto gravimétrico (AG).
Los modelos 2D permitieron determinar la profundidad y geometría del basamento y modelar la forma del domo riolítico presente en el área de trabajo, así como también proponer las distintas fallas normales mediante las cuales se emplaza. En el sector correspondiente al bajo gravimétrico BG, se modeló un aumento en la profundidad del basamento que alcanza los 238 m y que dio lugar al emplazamiento del domo riolítico. En la zona del alto gravimétrico AG se interpreta un ascenso del basamento con profundidades que no superan los 55 m. Los errores obtenidos en el modelado no superaron los 0.55 mGal.
Por todo lo expuesto se puede afirmar que el análisis e integración de los datos gravimétricos y de los resultados permitieron el entendimiento de la geometría, no solo del basamento, sino también del domo riolítico característico de este sector, lo que es relevante desde el punto de vista geológico, geofísico y exploratorio.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

REFERENCIAS

Bahía, M. E. Determinación de la geometría del basamento de la Cuenca del Golfo San Jorge mediante datos gravimétricos (Doctoral dissertation, Universidad Nacional del Sur) (2020).

Bahía, M. E., Longo, L. M. and Ravazzoli, C. L. Caracterización gravimétrica de la cuenca del Golfo San Jorge. *Decimoquinto Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra, Mendoza, Argentina. Actas de trabajos completos 45-56* (2020).

Bahía, M. E., Longo, L. M., Ravazzoli, C. L., Scivetti, N., Benedini, L., Marcos, P. and Gregori, D. A. Modeling and structural inversion from gravimetric data of the San Jorge Gulf Basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences, 112, 103606* (2021).

Blakely, R. J. Potential theory in gravity and magnetic applications. *Cambridge University Press* (1996).

Cortés, J. M. El substrato precretácico del extremo noreste de la Provincia del Chubut (1981).

Geosoft. Oasis Montaj How-To Guide. *Applying Filters with montaj Geophysics* (2013).

Geosoft. Oasis Montaj How-To Guide. *Complete Workflow for Oasis Montaj* (2014).

Hinze, W.J., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G., Forsberg, R., Hildenbrand, T., Keller, G.R., Kellogg, J., Kucks, R., Li, X., Mainville, A. and Winester, D. New standards for reducing gravity data: the North American gravity database. *Geophysics 70 (4), J25–J32* (2005).

Malvicini, L. and Llambías, E. J. Geología y génesis de los yacimientos de manganeso Arroyo Verde, provincia de Chubut, República Argentina. *V Congreso Geológico Argentino (Buenos Aires). Actas, 2, 185-202* (1974).

Talwani, M., Worzel, J.L. and Landisman, M. Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *J. Geophys. Res. 64 (1), 49–59* (1959).

Won, I.J. and Bevis, M. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: algorithms and Fortran subroutines. Geophysics 52 (2), 232–238 (1987).

Hinze, W. J., B. von Frese, R. R., and Saad, A. H. (2013). Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications. *Cambridge University Press.*

COLORES QUE SE HEREDAN: APROVECHAMIENTO DE PLANTAS TINTÓREAS EN MUJERES TEJEDORAS CAMPESINAS DEL SUR DE MENDOZA, ARGENTINA.

María P. Diez[a], Graciela S. Rios[b] y Leonardo S. Paulides[b]

[a] *Estación Experimental Agropecuaria Rama Caída, San Rafael, ARGENTINA*
[b] *Grupo de Estudios de Riesgos Ambientales y Cambio Climático - Instituto de Educación Superior 9-011 "Del Atuel", San Rafael, ARGENTINA*

e-mail: diez.paula@inta.gob.ar

RESUMEN

La elaboración de textiles y el uso del telar son prácticas culturales ancestrales que conforman espacios colectivos de trabajo y de encuentro de saberes. En estos, se intercambian prácticas y saberes técnicos, representaciones simbólicas y esquemas ideacionales, el diálogo intergeneracional de experiencias de vida entre tejedoras, pero, además, una forma de vinculación vivencial con un paisaje culturalmente construido. En este proceso, las plantas nativas tintóreas aportan condiciones únicas para teñir la materia prima ya hilada. Se asume que estos conocimientos brindan una oportunidad única para visibilizar y valorizar saberes ancestrales sobre el uso de la flora nativa y su aprovechamiento en realizaciones culturales poco conocidas como el teñido de materias primas textiles de origen animal. A partir del encuentro y diálogo entre tejedoras, se recupera el proceso de teñido de fibras de origen animal y las técnicas de telar, el conocimiento de las propiedades tintóreas de las especies nativas y el valor cultural del trabajo textil campesino. En este sentido, presentamos un modelo de flujo del proceso de teñido de las fibras textiles y una propuesta metodológica para la identificación y caracterización taxonómica de las especies empleadas en dicho proceso y una caracterización sobre las maneras por medio de las cuales se transmite y mantiene vigente este patrimonio intangible. Los resultados de este trabajo surgen a partir del vínculo con la experiencia comunitaria llamada "Telar Campesino" que nuclea a mujeres campesinas de los distritos de El Nihuil y Punta del Agua del departamento de San Rafael, Mendoza, Argentina.

Palabras Clave: Telar Campesino, Plantas Nativas Tintóreas, Género, Saberes ancestrales, Ruralidad.

INTRODUCCIÓN

El tejido de lana en telar de las comunidades campesinas de los distritos de El Nihuil y Punta del Agua en el departamento de San Rafael, provincia de Mendoza-Argentina constituye una actividad que significa una continuidad cultural de saberes ancestrales y una apropiación del territorio por parte de mujeres tejedoras campesinas. Los resultados de este trabajo surgen del vínculo con la experiencia comunitaria llamada "Telar Campesino" que nuclea a mujeres campesinas de estas localidades.

En esta tarea, convive un conjunto diverso y complejo de materiales, funcionalidades, usos y contextos de producción, junto con un rico componente de prácticas, expresiones, saberes y técnicas transmitidas por las comunidades de generación en generación que son representativas de la textilería tradicional de mujeres puesteras de las tierras secas del sur de la provincia de Mendoza. En este sentido, el arte textil local cuenta con un componente auténtico, ya que en él se emplean plantas con propiedades tintóreas (en adelante, PPT)

cuyo conocimiento y saberes involucrados representan un patrimonio material intangible (UNESCO, 2003).

Desde un punto de vista técnico, no podemos dimensionar al arte textil sin una comprensión integral de la tecnología, entendiéndose a ésta no sólo como un *know-how* que incluye prácticas o actos técnicos repetitivos, sino también como los escenarios sociales en los que se relacionan entre sí quienes realizan estos objetos, negociando intereses propios o de grupo en las configuraciones particulares del paisaje y sus transformaciones (Lemonnier, 1992; Cortegoso, 2005). En este sentido y desde una perspectiva social, el hilado, teñido y tejido son prácticas culturales ancestrales, a partir de las cuales se articula un espacio colectivo de trabajo, intergeneracional y significativo respecto a las representaciones y saberes del espacio entre mujeres campesinas.

Por último, el uso de PPT resume una apropiación de valores y atributos únicos del territorio, anclada en las experiencias de vida y el legado intergeneracional. Por ello, sostenemos que el saber etnobotánico y las propiedades tintóreas y medicinales de la flora nativa - e introducida naturalizada[1] - hacen a la construcción cultural del paisaje, pero también a una identidad entre quienes participan y desarrollan el arte tradicional textil en las localidades mencionadas.

Desde este trabajo, presentamos una propuesta para la caracterización de las PPT mediante la sistematización de la información a partir de acciones orientadas al relevamiento, registro, documentación, guarda y transferencia de conocimiento con y en las comunidades de tejedoras. En forma simultánea, proponemos recuperar saberes y métodos tradicionales relacionados con el teñido del tejido, proveer elementos que acompañen la continuidad de una práctica cultural con identidad regional y sustentable mediante soportes documentales y agregar valor a sus productos alentando al uso de tintes naturales, seguras y con bajo impacto ambiental. Esta propuesta es una instancia de trabajo de gestión participativa en la cual los saberes técnico-científico dan respuesta a una necesidad del colectivo (resignificando saberes y recuperando el conocimiento etnobotánico en complemento con el taxonómico.

TEJENDERAS[2] CAMPESINAS: SABERES ANCESTRALES Y CONTINUIDAD CULTURAL

Las zonas rurales de Los Toldos y Arroyo Los Leones se ubican en los distritos de El Nihuil y Punta del Agua en el departamento de San Rafael, provincia de Mendoza, Argentina (ver Fig. 1). El área incluye ecosistemas áridos caracterizados por una estructura espacial en parches e ingresos hídricos altamente estocásticos (Bertiller et al, 2009). Fitogeográficamente la región es área ecotonal ya que en ella convergen las provincias fitogeográficas del Monte y la Patagónica, según algunos autores (Cabrera, 1976; Roig et al, 1980). Las condiciones climáticas extremas, el escaso régimen de lluvias y la escasez de pasturas hacen que las actividades de subsistencia asociadas al pastoreo de caprinos sean una de las pocas alternativas posibles en estos entornos. En este marco socioambiental, las mujeres tejedoras son actores sociales centrales en las redes de integración y vinculación entre las comunidades del desierto. A la vez que realizan las tareas de arreo de su ganado caprino, el trabajo en las pariciones y destete, la recolección

[1] Por **flora introducida naturalizada** entendemos a las plantas que a pesar de no ser oriundas del país en el que crecen, medran en él y se propagan como si fueran autóctonas. Se aplica a las adventicias que se aclimatan y resisten la competencia de las demás plantas (Font Quer, 1993)

[2] Las mujeres tejedoras se definen a sí mismas como *tejenderas* en sus comunidades de pertenencia.

de leña y la producción en la huerta familiar llevan adelante el arte textil en telar vertical desde al menos cuatro generaciones.

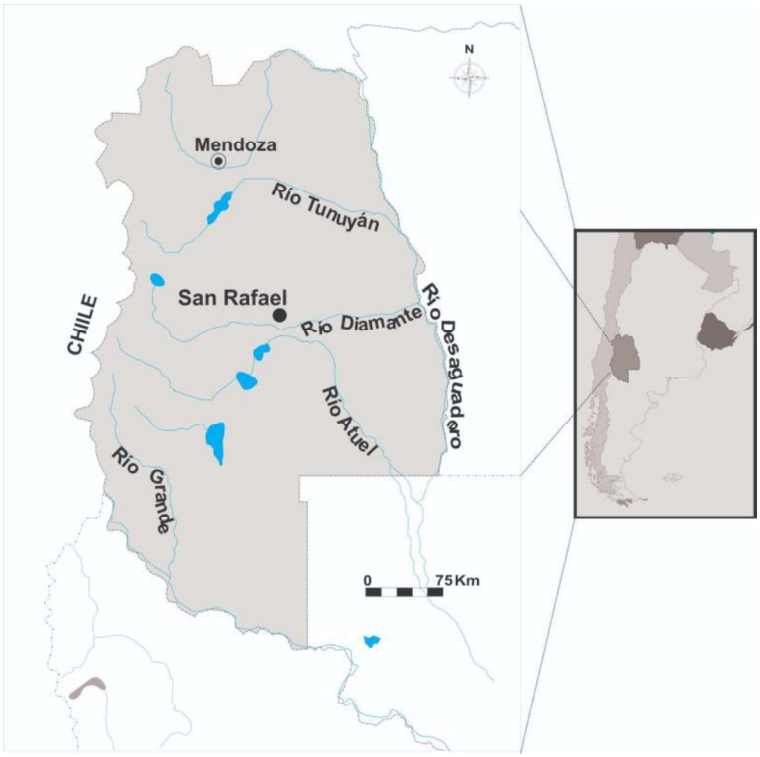


Figura 1. Mapa con localización de la ciudad de San Rafael (Provincia de Mendoza, Argentina).

El conjunto de actividades relacionadas con el tejido es transmitido intergeneracionalmente dentro del ámbito familiar nuclear y el extendido. El arte textil se aprende desde niñas, ya sea hilando, recolectando plantas tintóreas o aprendiendo las labores del tejido y su simbología. La producción textil es amplia y pueden ser elementos de laboreo como ponchos y ataderas para botas de potro o de vestimenta y utilitarios como mantas, fajas, maletas, caminos de mesa, yerbateras y se orienta a la familia o vecinos.

En la perdurabilidad de esta tradición textil interviene un intercambio de prácticas y saberes técnicos, representaciones simbólicas y esquemas ideacionales que dan marco a un diálogo intergeneracional de experiencias de vida entre tejedoras que aún se mantiene. De este modo, existen valores y atributos que permiten incluir a estos saberes dentro de la categoría de **patrimonio cultural inmaterial.** La Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial[3] (UNESCO, 2003:5) lo define como como:

"(...) los usos, representaciones, expresiones, conocimientos y técnicas -junto con los instrumentos, objetos, artefactos y espacios culturales que les son inherentes- que las comunidades, los grupos y en algunos casos los individuos reconozcan como parte integrante de su patrimonio cultural. Este patrimonio cultural inmaterial, que se transmite de generación en generación, es recreado constantemente por las comunidades y grupos en función de su entorno, su interacción con la naturaleza y su historia, infundiéndoles un sentimiento de identidad y continuidad y contribuyendo así a promover el respeto de la diversidad cultural y la creatividad humana."

[3] Aprobada como Ley Nacional 26.118 por el Congreso de la Nación Argentina el 5 de julio de 2006.

Los valores de integridad y autenticidad de este patrimonio cultural se manifiestan de varias maneras. En primer lugar, su origen campesino y su condición de mujeres crianceras que continúan con su forma de vida en el medio rural. En segundo lugar, son el testimonio de una tradición local de hilanderas y tejedoras con saberes, técnicas y prácticas de telar que son únicas en la zona y adquieren un valor agregado por tener una estrecha relación con un territorio de manera ancestral ya sea como espacio vital ligado a la subsistencia o mediante el conocimiento etnobotánico de la flora nativa ya sea por sus propiedades tintóreas, medicinales, alimenticias, forrajeras o por su toxicidad potencial para el ganado y caballos. En tercer lugar, el arte textil es un espacio central en la vida doméstica y un fenómeno integrador que se inserta en una compleja trama que vincula por un lado a los conocimientos y los usos relacionados con la naturaleza y el trabajo comunitario y el parentesco y; por el otro, a las identidades campesinas en diálogo con el universo a partir de la manifestación de lenguajes artísticos, representaciones y sistemas simbólicos particulares (Mege Rosso, 1990; Alvarado, 1998). Entendido de este modo, estas técnicas artesanales tradicionales constituyen un testimonio de una continuidad cultural particular en el territorio rural actual.

Estas prácticas, junto con las relacionadas con la cría de ganado caprino en tierras secas, permiten considerar a la interacción con el espacio geográfico como un paisaje culturalmente construido con valores naturales y culturales propios desde una vinculación experiencial característica y con atributos propios de este territorio (UNESCO, 1972; 2003; 2005). La particularidad de paisajes culturales tradicionales representa además el uso sostenible de la tierra, teniendo en cuenta las limitaciones de este ambiente natural y facilitando el mantenimiento de la diversidad biológica.

En este proceso, las PPT son un atributo natural del paisaje que aporta un elemento indispensable para teñir la lana, pero además significan una oportunidad singular para visibilizar y valorizar saberes ancestrales etnobotánicos anclados en la experiencia sensorial que dan sentido de pertenencia y arraigo a un territorio desde las edades más tempranas, imprimiendo también los valores del lugar a la existencia de estas poblaciones cotidianamente. De este modo, el tejido deja de ser parte de la materialidad de la vida campesina para convertirse en una trama de atributos culturales que hacen a la identidad de los actores que interactúan en torno a éste.

Por último, son las mujeres de edad avanzada quienes cuentan con la experiencia de vida y conocimientos sobre PPT y el arte textil más desarrollados. Muchas de ellas tienen escasa visión o son analfabetas por lo que el simbolismo de patrones y diseños, las técnicas en las labores y uso de flora nativa corre el riesgo de perderse en el tiempo de una generación si no se realiza su debido registro documental. Es por ello que consideramos que existe una demanda sociocomunitaria real que puede ser abordada desde un proyecto como el presente, mediante un trabajo colaborativo entre los conocimientos tradicionales de las tejedoras y su documentación sistematizada aportada por profesionales con enfoques multidisciplinares. Esta tarea no pretende ser un aporte documental, sino una contribución para comprender la centralidad del telar como eje articulador de redes de mujeres, del sostenimiento de la economía familiar campesina y de los valores identitarios y culturales de los puesteros del sur de la provincia de Mendoza, Argentina.

USO DE PLANTAS CON PROPIEDADES TINTÓREAS Y ARTE TEXTIL

Aprender a tejer en telar Mapuche o *witral* en las comunidades campesinas es una oportunidad para enriquecer una conformación contextualizada de los territorios locales

desde manifestaciones artísticas propias y aquellas que se heredan del pasado que significan transmisiones, experiencias y significados, mediante las cuales emerge una comprensión del mundo y una relación con la vida y la naturaleza que se manifiestan en símbolos con valor cultural. Por otro lado, las técnicas textiles se convierten en un escenario que ofrece una instancia de interacción única en la que existe un encuentro y un aprendizaje conjunto entre maestra-aprendiz, donde el ejercicio del tejido va tramando relaciones, historias y vidas (García Gualda, 2013; Raquimán Ortega, 2019: 328-329).

Desde un punto de vista tecnológico, el telar involucra el despliegue y dominio de 'técnicas'. Éstas son "(...) *el conjunto de conocimientos y prácticas construidos históricamente en la región, que se entienden en el nivel intelectual y corporal a la vez que se practican en contextos materiales y de la esfera de los artefactos. Esta interacción tecnológica entre lo corporal y lo material contribuye al sentido identitario, tanto del artefacto así generado como del participante (individual o grupal) en una comunidad de práctica específica*." (Arnold D. and Espejo E., 2019: 6). Esta interacción deriva en la realización de artefactos tecnológicos materiales para diferentes fines y contextos (*e.g* de laboreo, vestimenta, ritual, etc.), cuya aceptación - o no - depende de convenciones sociales, relaciones de poder entre los actores involucrados, etc.

El proceso de producción de tejido en telar es un proceso que requiere de diferentes tratamientos y transformaciones de la materia prima lanar. Entre los cambios en las propiedades originales, existen saberes y prácticas relacionados con la recolección o extracción de la lana, su tratamiento (e.g esquila, hilado, torcelado, teñido), aún antes de iniciar el proceso de elaboración textil (urdido, tejido y acabado). En cada uno de estos procesos existen marcadas diferencias respecto a cómo cada tejedora o grupo al cual ésta pertenezca reproduce una serie de procedimientos que en conjunto hacen a una *cadena operativa del textil*. En suma, la estructura textil (Arnold D. and Espejo E., 2019), las técnicas textiles y de elaboración empleadas y el componente simbólico en cada textil por cada tejedora o colectivo de tejedoras pueden constituir un componente identitario de las comunidades productoras (Úbeda M. and Loncopán M., 2018; Arnold D. and Espejo E., 2019).

Un valor adicional se asocia al uso de las PPT en las comunidades de tejenderas, que aportan condiciones únicas para teñir la lana ya hilada ya que son especies con concentraciones de colorante en diferentes órganos, como raíces, tallos, hojas, flores y semillas (Acuña L. and Rivera G., 1990). Los colorantes producidos por la actividad fisiológica de las plantas se hallan en mayor concentración en las vacuolas de las células vegetales, donde se asocian con otros elementos como aceites, resinas, taninos con carácter astringente y otros (Acuña L. and Rivera G., 1990). Casi todas las plantas contienen alguna materia colorante de modo que cualquiera de ellas sirve para teñir. A pesar de ello, es la cantidad de colorante que contienen la que pareciera incidir en su selección a lo largo del tiempo (Kojima, 2009). Del registro de PPT, las familias mejor representadas son *Fabaceae* y *Asteraceae* (Stramigioli, 2004; Dogan et al, 2008; Del Vito L.A and Petenatti E.M., 2009; Marzocca, 2009; Albán-Castillo et al, 2018, entre otros). Así, las tejedoras utilizan el material vegetal tintóreo de especies nativas de las provincias fitogeográficas del Monte y Patagónica en pequeña escala.

En resumen, estos conocimientos brindan una oportunidad única para visibilizar y resaltar los saberes ancestrales sobre el uso de la flora nativa y su aprovechamiento en realizaciones culturales poco conocidas como el teñido de materias primas textiles de origen animal.

METODOLOGÍA DE RELEVAMIENTO

Consideramos que el saber etnobotánico puede enriquecerse con un enfoque multidisciplinario con el cual relevar diferentes aspectos de la información compartida por los actores sociales. A partir del diálogo entre tejedoras, rescatamos este conocimiento mediante un relevamiento florístico participativo de las PPT que incluye su registro, herborización, registro fotográfico y documentación, entre otras acciones. Para llevar a cabo esto, nos centramos en las contribuciones metodológicas de la botánica y la antropología cultural. A continuación, dividimos las estrategias a seguir desde estos enfoques complementarios:

A. PLANTAS CON PROPIEDADES TINTÓREAS

El proyecto implica tareas de relevamiento, registro y documentación en campo y de edición y organización de la información en laboratorio/gabinete. En ambos escenarios, consideramos que el trabajo sobre los saberes por registrar debe ser colaborativo entre los aportes técnicos de los profesionales y las tejedoras portadoras del conocimiento etnobotánico.

En segundo lugar, es importante encuadrar las tareas de registro y relevamiento florístico de especies nativas según estándares para la colecta y herborización de PPT. En este sentido, a los instrumentos de relevamiento tanto documental como fotográfico, se les sumará una ficha taxonómica. La suma de los materiales colectados se documentará en formato físico y digital en colaboración con el Museo de Historia Natural de San Rafael para finalmente conformar un catálogo vegetal de acceso público en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA en Rama Caída (San Rafael).

En el proceso de la colecta de los ejemplares vegetales, se aplicará el método convencional de recolección, prensado y secado para la posterior determinación taxonómica (Lima dos Santos et al, 2014). Se recolectarán 2 ejemplares por número de colección, para la respectiva *exsiccata* botánica y muestras de los órganos vegetales, para la réplica de extracción del tinte. Las especies serán identificadas mediante el uso de claves taxonómicas, bibliografía especializada según las familias botánicas reportadas, herbarios virtuales como Neotropical Herbarium, Plants Jstor, Kew Herbarium y comparaciones con material del herbario del Museo de Historia Natural de San Rafael. La clasificación taxonómica se basará en el sistema de clasificación APG IV (APG IV, 2016) y los nombres científicos serán corroborados con la versión on-line del Catálogo de las Plantas Vasculares del Cono Sur (Zuloaga et al, 2015, 2019). Los ejemplares botánicos, debidamente clasificados y herborizados serán depositados en la EEA INTA Rama Caída.

En tercer lugar, lo antes planteado se complementará con el registro fotográfico y fílmico de todo el proceso de teñido (desde colecta hasta el secado e hilado) complementando las fichas del herbario digital y con posibilidades de estar disponibles como material etnobotánico mediante la consulta previa, libre e informada con las tejedoras.

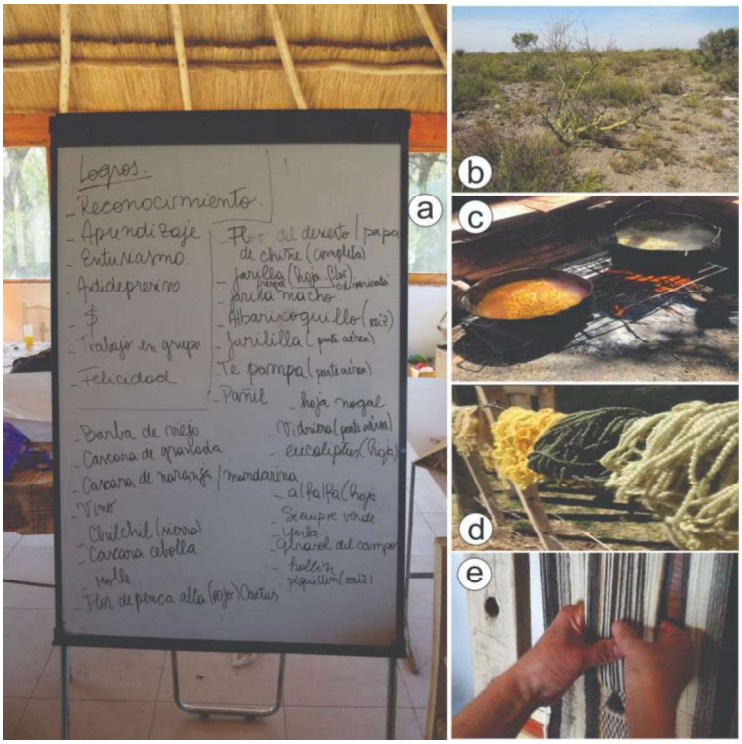
Por último, con la información obtenida se generarán dos productos para el conocimiento y para la socialización de estos saberes. Por un lado, se editará un folleto de buenas prácticas para la recolección sustentable de material vegetal de flora nativa destinado a las tejedoras. Por otro lado y como complemento, incorporamos las fichas digitales del herbario y la información etnobotánica en un cuadernillo que permita conservar y resguardar estos conocimientos y que a la vez, actúe como guía de campo para la identificación de las propiedades tintóreas de las plantas para las tejedoras actuales y sus descendientes.

B. PATRIMONIO CULTURAL

Partimos del supuesto que los saberes y el conocimiento etnobotánico tendrán diferentes manifestaciones según algunas variables del conjunto de mujeres como ser su edad, *expertise* en el tejido y tipo de productos realizados, variaciones de la flora en el territorio, etc. Esto nos lleva a evaluar cómo se manifiestan los valores y los atributos del patrimonio cultural inmaterial al interior del colectivo de tejenderas agrupadas bajo Telar Campesino. Por este motivo, consideramos importante focalizarnos en estrategias de relevamiento en campo que permitan situar y significar los saberes sobre el uso de PPT entre las mujeres de este colectivo. Para ello proponemos dos momentos de trabajo. En primer lugar, mediante entrevistas abiertas, individuales o colectivas (Guber, 2001; Benadiba, 2007) recuperaremos conocimientos relativos a las historias de vida en torno a la actividad de tejendera y con especial énfasis en las PPT usadas, la manera de obtener este conocimiento, la localización de la planta y la toponimia local, su nomenclatura en castellano o lenguas originarias, las partes empleadas para dicho proceso, la forma, época y área de recolección, lo mismo que colores obtenidos. En segundo lugar, registramos las cadenas operativas relacionadas con las técnicas relacionadas con el proceso de teñido como ser la obtención de tintes y la variedad de colores logrado, la técnicas de teñido, los materiales sometidos a coloración y el uso de mordientes, entre otros elementos. Con esto, nos proponemos recuperar y documentar los distintos tipos y diversidad de estrategias de teñido entre las diferentes tejedoras del colectivo de mujeres.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A mediados de septiembre de 2022, tuvo lugar un encuentro del colectivo de tejenderas de Telar Campesino. En éste se socializaron las impresiones sobre este emprendimiento (ver Fig. 2.a) y se compartió el conocimiento etnobotánico sobre las PPT (Ver Fig. 3), generando un primer *corpus* de información para ajustar los instrumentos de relevamiento inicialmente sugeridos para el trabajo de campo propuesto en este artículo.



 ISBN: 978-987-1323-89-0

Figura 2. a. Relevamiento sobre PPT en encuentro Telar Campesino (16.9.2022) **b.** *Parkinsonia praecox* en hábitat natural. **c**. Teñido en olla. **d**. Secado de laña teñida. **e.** Tejido final en telar.



Figura 3. a. Intercambio de saberes sobre producción de colores y trabajo textil. **b.** Madejas de muestra con tintes obtenidos y etiquetas con nombres de plantas. **c**. Identificación de partes vegetativas usadas para el teñido con colección herborizada. **d**. Registro personal y diario de tejedora con fórmulas y muestra de colores.

Como se aprecia en la Tabla I, las tejenderas reportaron el uso de PPT que incluye 22 especies nativas e introducidas, con un 59% para las primeras y 41% en las segundas. Como se observa, algunas de las especies o parte de ellas, corresponden a plantas introducidas que están asociadas con la dieta y el forraje animal, esperándose una asociación espacial introducidas/puesto, por lo que se puede usar esta relación a modo de marcador espacial o landmark a nivel regional. *Asteraceae* es la familia taxonómica mayoritariamente representada. Se han registrado otros elementos tintóreos como vino y hollín.

Tabla I. Algunas especies de plantas tintóreas utilizadas. Encuentro de Telar Campesino realizado el 16.9.2022 en Agua de los Caballos, San Rafael.

Familia	Nombre Científico	Nombre Local	Nativa	Parte Vegetativa
Zygophyllaceae	*Larrea nitida* Cav.	Jarilla crespa	SI	Flor, hojas
Zygophyllaceae	*Larrea cuneifolia* Cav.	Jarilla Macho	SI	Flor, hojas
Ranunculaceae	*Clematis montevidensis* Spreng.	Barba de viejo	SI	Hoja
Punicaceae	*Punica granatum* L.	Granada	NO	Fruto
Rutaceae	*Citrus spp*	Naranja/Mandarina	NO	Cáscara

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Familia	Nombre Científico	Nombre Local	Nativa	Parte Vegetativa
Asteraceae	*Tagetes pauciloba* DC.	Chilchil	SI	Flor, hoja
Amaryllidaceae	*Allium cepa* L.	Cebolla	NO	Cáscara
Anacardiaceae	*Schinus sp*	Molle	SI	Hoja
Cactaceae	*Denmoza rhodacantha* (Salm-Dyck) Britton & Rose	Cardón	SI	Flor
Olacaceae	*Ximenia americana* L.	Albaricoquillo	NO	Raíz
Asteraceae	*Pentaphorus glutinosus* D. Don	Jarililla	SI	Partes aéreas
Asteraceae	*Thelesperma megapotamicum* (Spreng.) Kuntze	Té pampa	SI	Partes aéreas
Scrophulariaceae	*Buddleja globosa* Hope	Pañil	SI	Hoja
Juglandaceae	*Juglans regia* L.	Nogal	NO	Hoja
Chenopodiaceae	*Suaeda divaricata* Moq.	Vidriera	SI	Partes aéreas
Myrtaceae	*Eucalyptus globulus* Labill.	Eucaliptus	NO	Hoja
Fabaceae	*Medicago sativa* L.	Alfalfa	NO	Hoja
Aquifoliaceae	*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil.	Yerba	NO	Tallos, hoja
Oleaceae	*Ligustrum sp*	Siempre verde	SI	Hoja
Solanaceae	*Lycium sp*	Piquillín	SI	Raíz
Asteraceae	*Verbesina encelioides* (Cav.) Benth. & Hook. f. ex A. Gray	Girasol del campo	NO	Flor, hoja
Hydnoraceae	*Prosopanche bonacinae* Speg.	Flor del Desierto/papa de chiñe	SI	Espécimen entero

CONCLUSIONES

El trabajo con las tejenderas es exploratorio y la riqueza de saberes sobre PPT amerita el desarrollo de encuentros en el terreno para un relevamiento de datos etnobotánicos y antropológicos. A pesar de ello, el encuentro con las mujeres puesteras permitió considerar ideas preliminares respecto al uso de PPT en sus textiles.

En primer lugar, se emplean todo tipo de flora en el campo, sea ésta nativa o introducida, aunque existe un marcado predominio de las primeras. Como futuras hipótesis de trabajo respecto a estas especies, se puede indicar que éstas contarían con un mayor potencial tintóreo que las introducidas, o que existe un mayor conocimiento de sus propiedades por estar vinculadas con su ocupación ancestral o bien que la frecuencia de uso de las introducidas en un medio rural es menor ante una distribución y cobertura circunscrita al

área de influencia de los puestos y su locación. En segundo lugar, existe un importante acervo cultural de PPT que no ha sido registrado. Al respecto, la identificación y taxonomía con nombres originarios se está perdiendo (aunque se mantiene muy presente entre los hombres).

Por último, podemos concluir que el arte textil cumple un rol fundamental para reforzar vínculos entre puestos espacialmente distantes y posiciona a las mujeres como sostenedoras de saberes ancestrales arraigados en su territorio. Así, el telar juega un rol central como espacio de encuentro, de una identidad campesina, de parentesco y de saberes.

REFERENCIAS

Acuña, L., and Rivera, G. *Plantas tintóreas y otros colorantes de Costa Rica*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 144 p. (1990).

Albán Castillo, J., Espinoza, G., Rojas, R. and Santibáñez, C.D. El color de la memoria: tintes vegetales usados en la tradición de las comunidades andinas y amazónicas peruanas. *Ecología Aplicada* 17, 85-96. (2018)

Alvarado, M. Recursos y procedimientos expresivos en el universo textil Mapuche: una estética para el adorno, *Boletín del Comité Nacional de Conservación Textil, n°3,* 43-55. (1998).

APG IV (Angiosperm Phylogeny Group IV). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society* 181 (1), 1-20. (2016).

Arnold, D., and Espejo, E. *Ciencia de tejer en los Andes: Estructuras y técnicas de faz de urdimbre*. La Paz. ILCA: Serie Informes de Investigación, II, Nº 7. Segunda edición (2019).

Benadiba, L. *Historia Oral, Relatos y Memorias*, Editorial Maipue, Buenos Aires. (2007).

Bertiller, M.B., Marone, L., Baldi, R. and Ares, J.O. Biological interactions at different spatial scales in the Monte desert of Argentina, *Journal of Arid Environments* 73 (2), 212-221, (2009).

Cabrera, A. L. Regiones fitogeográficas argentinas. En Kugler WF (Ed.) *Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería*. Tomo 2. 2a edición. ACME. Buenos Aires. Fascículo 1, 1-85. (1976).

Cortegoso, V. Aproximaciones teóricas y metodológicas para el estudio tecnológico: variables sincrónicas y diacrónicas en el análisis lítico, *Anales de Arqueología y Etnología* 59-60, 107-148. (2005).

Del Vitto, L.A. and Petenatti, E. M. Asteráceas de importancia económica y ambiental. Sinopsis morfológica y taxonómica. Importancia ecológica y plantas de interés industrial. *Multequina* 18, 87-115 (2009).

Dogan, Y., Baslar, S., Ozturk, M., and Mert, H.H. Plants used as dye sources. *Underutilized and underexploited horticultural crops*. Vol. 3, 109-145 New India Publishing Agency. (2008).

Font Quer, P. *Diccionario de Botánica*. Editorial Labor. (1993).

Garcia Gualda, S. M. El tejido como herramienta de negociación identitaria y transformación política de las mujeres mapuce, Universidad Nacional del Nordeste. Centro de Estudios Sociales; *De Prácticas y Discursos* 2 (2), 1-13. (2013).

Guber, R. *La Etnografía. Método Campo y reflexividad*, Grupo Norma Editorial, Buenos Aires. (2001).

Kojima, H. *Taller de Teñido con Añil y Otros Colorantes Naturales*. San Miguel, El Salvador. (2009).

Lemmonier, P. *Elements for an Anthropology of Technology*, Anthropological Papers Museum of Anthropology 88. University of Michigan. Ann Arbor, Michigan (1992).

Lima dos Santos, L., Vieira F., Gomes de Sousa, L., Oliveira da Silva, A., Lima dos Santos L. and de Sousa, G.M. Techniques for Collecting and Processing Plant Material and Their Application in Ethnobotany Research, En: *Methods and Techniques in Ethnobiology and*

Ethnoecology, 161-173. Albuquerque, U., Vital Fernandes C. da Cunha, L., Farias Paiva de Lucena, R. and Nobrega Alves, R. (Eds.). Humana Press (2014).

Marzocca, A. *Compendio práctico de tintes naturales vegetales en la Argentina*. 1er Edición Buenos Aires. Orientación Gráfica editora (2009).

Mege Rosso, P. *Arte textil Mapuche*, Ministerio de Educación, Departamento de Extensión Cultural, Santiago de Chile. (1990).

Raquimán Ortega, P. En búsqueda de prácticas decolonizadoras: WITRAL el telar mapuche y sus aproximaciones didácticas, *Revista GEARTE*, 6 (2), 326-340. Porto Alegre (2019).

Roig, F.A., De Marco, G. and Wuilloud, C. El límite entre las provincias fitogeográficas del Monte y de la Patagonia en las llanuras altas de San Carlos, Mendoza. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 19, 331–338.(1980).

Úbeda, M., and Loncopán, M. Códigos ancestrales en resistencia: Witral Mapuche. Mujer mapuche reivindica su pueblo, por medio del arte textil en Santiago de Chile. *Memoria del XVIII Foro de Estudiantes Latinoamericanos de Antropología y Arqueología*, 135–148. (2012)

UNESCO *Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural*. World Heritage Centre (1972).

Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial. París. (2003).

Directrices Prácticas para la aplicación de la Convención del Patrimonio Mundial. (2005).

Stramigioli, C. *Teñido con colorantes naturales. Recuperación de una técnica tradicional.* Búsqueda-Ayllu. 3° Edición. (2004).

Zuloaga, F. O. and M. J. Belgrano. The Catalogue of Vascular Plants of the Southern Cone and the Flora of Argentina: their contribution to the World Flora. *Rodrigúesia* 66 (4), 989-1024. (2015).

Zuloaga, F., Belgrano, M., and Zanotti, C. Actualización del Catálogo de las Plantas Vasculares del Cono Sur. *Darwiniana, Nueva Serie 7* (2), 208-278. (2019).

EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN UN EMPRENDIMIENTO AGROPECUARIO, VILLA MERCEDES. SAN LUIS. ARGENTINA.

Daniel A. Dueñas[a], Graciela del R. Sosa[ab] y Francisco Herrera Sánchez[a]

[a]*Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, ARGENTINA*
[b]*Escuela de Ingeniería y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Villa Mercedes, ARGENTINA.*

e-mail: dduenas@unsl.edu.ar

RESUMEN

La erosión hídrica en las últimas décadas afectó de manera severa a terrenos cultivados y construcciones por el avance de cárcavas y el posterior desarrollo de cauces fluviales como ocurre en el emprendimiento agrícola denominado "Las Barrancas" que se ubica a 25 km al norte de la ciudad de Villa Mercedes. Este problema ambiental parece responder, entre otras cosas, a la configuración geológica-geomorfológica. El relieve es suavemente ondulado con sedimentos eólicos, aluviales y loessoides en donde se desarrollan suelos susceptibles a la erosión eólica e hídrica. La red de drenaje es rectilínea y refleja la fracturación de bloques subaflorantes del basamento cristalino. Por otra parte, el cambio de uso de la tierra como respuesta a la explotación de los recursos naturales con escaso control y el incremento de las precipitaciones en los últimos 50 años propiciaron el agravamiento de los procesos erosivos. El desarrollo de cárcavas es muy importante y su avance remontante parece estar vinculado con procesos de erosión por sufusión y su profundidad se relaciona posiblemente con el esfuerzo cortante de caudales generados en eventos extraordinarios de lluvia como los ocurridos en los años 2001, 2008 y 2015. El objetivo del trabajo fue realizar un análisis multitemporal mediante imágenes satelitales y controles de campo con el fin de realizar un diagnóstico de la situación a través de técnicas de mapeo de erosión hídrica del suelo para diferentes años utilizando herramientas del sistema de información geográfica QGIS. Como resultado se generaron cartas temáticas de interés para el estudio y gestión de la amenaza de erosión de suelo y se propusieron recomendaciones generales para la mitigación en diferentes sectores del emprendimiento agropecuario.

Palabras Clave: Análisis Multitemporal, Cárcavas, Erosión, Precipitaciones, QGIS.

INTRODUCCIÓN

El Gobierno de San Luis durante el año 2016 declaró la emergencia pública en materia ambiental en la cuenca de El Morro y su área de influencia (Ley Nº IX-0939-2016) por un período de 5 años y su prórroga (Decreto 2.697/2021), debido a los efectos provocados por el desequilibrio hídrico que afecta a 373.000 hectáreas. Es un grave problema ambiental que enfrenta la provincia y su causa estaría vinculada a la acción conjunta de procesos naturales y antropogénicos. Diversas investigaciones acerca de esta problemática coinciden en que la intervención de varios factores ha favorecido esta situación (Bernasconi et al, 2015). Uno de ellos está ligado a la configuración geológica y geomorfológica de la cuenca y el desarrollo de los suelos sobre materiales loéssicos y arenosos susceptibles a la erosión eólica e hídrica (Barbeito et al, 2008).

Por otro lado, investigadores como Jobbágy et al, 2016 señalan que el intenso avance rural que ha sufrido la cuenca hidrográfica de El Morro y sus alrededores ha traído como consecuencia una fuerte presión en lo relacionado con la explotación de sus recursos

naturales (agua, bosque y suelo) en forma no sostenible, lo que ha provocado cambios en la regulación hídrica de la misma. Otro factor que está ligado íntimamente y que ha propiciado el agravamiento de los procesos es el aumento de las lluvias (Ojeda y Sosa 2009, Sáenz et al, 2016, Collado, 2017). Ríos (2020) señala que la precipitación media anual de Villa Mercedes aumentó de 500 mm en el año 1903 a 778 mm en el año 2012 y en concordancia, los registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) indican que 2015 fue el año con más lluvias de toda la historia de la ciudad, con un récord de 1130,1 mm. Por consiguiente, asociado a las temporadas más húmedas se ha experimentado un incremento de la frecuencia de eventos de precipitación extrema (>50 mm/día) que en los últimos 12 años se traduce en picos de caudales máximos que favorecen los procesos erosivos en la cuenca (Dueñas, 2021).

En este trabajo se realizó el diagnóstico de la erosión del suelo que afecta negativamente al emprendimiento agropecuario denominado "Las Barrancas" ubicado en la zona central de la subcuenca río Nuevo (cuenca hidrográfica El Morro) que en los últimos 20 años ha ido reduciendo áreas productivas y forestales. El objetivo de esta investigación fue efectuar un inventario de los procesos de erosión hídrica para identificar su evolución y seleccionar las estrategias de mitigación adecuadas con el fin de reducir los niveles de amenaza y mitigar sus efectos.

AREA DE ESTUDIO

El sitio de interés se encuentra ubicado en la parte media de la subcuenca del río Nuevo, entre los parajes La Aguada y La Rinconada, sobre la ruta provincial N° 33 a 25 km al norte de la ciudad de Villa Mercedes (ver Fig. 1).



Figura 1. a. Mapa de la cuenca de El Morro (Modificado de Galván y Collado, 2009). **b.** Ubicación del área de estudio (Imagen satelital tomada de Google Earth, 2022).

METODOLOGÍA

El trabajo incluyó la revisión de antecedentes bibliográficos, la producción de una cartografía multitemática preliminar basada en el análisis temporal de los procesos de erosión laminar, surcos, cárcavas y de cauces fluviales en imágenes satelitales del software Google Earth© y el posterior relevamiento y control de campo. La información recopilada se integró luego en gabinete bajo un entorno SIG utilizando las herramientas del programa QGIS, generando una cartografía final que proporcionó la información de base para conocer el escenario actual y realizar el diagnóstico de la situación del sitio.

CLIMA E HIDROGRAFÍA

La región presenta características climáticas de la zona continental mediterránea Argentina (Gez, 1939) aunque es modificado por el efecto del relieve en aquellas zonas con contrastes altitudinales marcados que se asocian a las elevaciones serranas. La evapotranspiración potencial presenta, en general, valores mayores que los alcanzados por las lluvias, provocando localmente un balance hídrico negativo (Capitanelli y Zamorano, 1972).

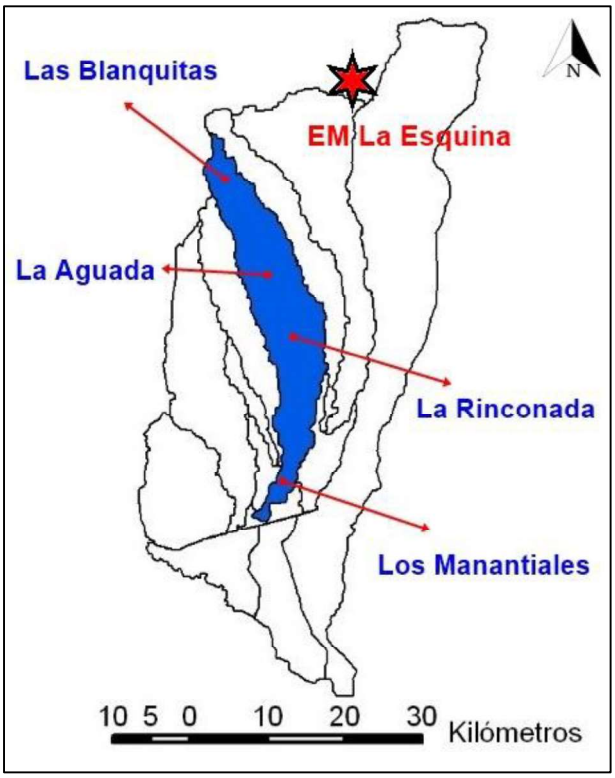


Figura 2. Ubicación de la subcuenca del río Nuevo, estación meteorológica La Esquina y parajes. (Modificado de Galván y Collado, 2009).

El río Nuevo nace en el flanco suroriental de la serranía de El Morro-Yulto a 1631 m s.n.m. desde donde desciende en dirección sudeste, hasta sus derrames terminales (514 m s.n.m.). La subcuenca (ver Fig. 2) presenta una superficie de 27.614 ha, perímetro de 128 km, desnivel de 1117 m y una longitud de 49,37 km y se divide en tres zonas de características bien definidas. La zona alta o superior se encuentra entre la transición de dos ambientes geomorfológicos, desde el piedemonte a las planicies, en el cual el río desciende con una pendiente promedio superior al 2% abarcando desde el paraje Las Blanquitas (cabecera del río) hasta alcanzar el paraje La Aguada ubicado a 2500 m aguas arriba del puente de la RP N°33. Desde ese punto comienza la zona media, hasta sobrepasar el paraje La Rinconada donde la pendiente del lecho es cada vez menor con valores cercanos al 1%. En tanto que la zona baja, próxima a la RN N°8 en el paraje Los Manantiales, la pendiente promedio es menor a 1% y se asocia con los derrames terminales y desagües canalizados hacia el río Quinto (475 m s.n.m.).

CONTEXTO GEOLÓGICO -GEOMORFOLÓGICO

Los rasgos geomorfológicos de la región se caracterizan por presentar un marcado control estructural, representado por la clásica estructura de bloques y depresiones longitudinales de las Sierras Pampeanas que identifica al centro y norte de la provincia de San Luis,

mientras que su extremo austral muestra los rasgos típicos de la Llanura Pampeana (González Díaz, 1981).

En la zona de estudio el ambiente serrano queda representado por las sierras de El Morro-Yulto, constituida casi en su totalidad por rocas del basamento cristalino metamórfico-plutónico de edad precámbrica-paleozoica inferior y depósitos volcánicos mio-pliocenos, cuya orientación en sentido meridional está influenciada por la presencia de la escarpa de la falla homónima (Costa et al, 2005). Está separada toponímicamente en la sierra de Yulto (de menor altitud) hacia el sur y la sierra de El Morro al norte, la cual incluye un cerro con diseño circular bien definido y en su cima una depresión con pequeños conos volcánicos (Costa et al, 2005). La zona pedemontana litológicamente se compone de rocas del basamento cubiertas de material piroclástico y rellenos coluvio-aluviales asignados al Cuaternario, definiendo un relieve alternante entre lomadas y valles menores con fondo plano-cóncavo y distribución radial (Barbeito et al, 2008).

El ambiente de depresiones queda referido a la Planicie Loessica-Arenosa (Barbeito et al, 2008) que hacia el norte del área de estudio presenta sedimentos eólicos (loessoides y arenosos). Estos últimos subyacen sobre loessoides y su conjunto apoya tanto en basamento cristalino como en depósitos volcánicos y/o fluviales. Mientras que la mitad sur, comprende una porción de la Planicie Arenosa (Barbeito et al, 2008) como parte del ambiente de la llanura Pampeana donde predominan los sedimentos loessoides y arenosos (arenas eólicas retrabajadas y retransportadas) y sedimentos limo-arenosos pobremente consolidados. Los sedimentos de planicies son asignados al Pleistoceno-Holoceno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tramo de río bajo estudio tiene 2,9 km de longitud, medidos sobre el eje del cauce, presenta sinuosidad media y carga suspendida con un ancho de canal lleno de 60 m en promedio (ver Fig. 3 a). La pendiente oscila desde 0,5 a 1,2% y la profundidad de valle varía entre 15 y 17 m. Discurre a través de barrancas muy pronunciadas donde la erosión del fondo de canal es notoria y seguida por la ampliación del cauce que se ve favorecida por procesos de socavación de márgenes y colmatación en las curvas internas (ver Fig. 3 b). El material del lecho del río se compone mayoritariamente por limo y arenas muy finas y en algunos lugares del tramo de estudio se observan resaltos vinculados con conglomerados calcáreos muy cementados resistentes a la erosión vertical. La geometría del cauce presenta una sección trapezoidal con márgenes bien definidas y poco cohesivas, lo que le confiere baja resistencia a la erosión lateral. Además, se identificaron 2 niveles de terrazas y sectores donde se evidencian procesos de desbarrancamiento (ver Fig. 3 c).

El segmento de 700 m lineales comprendido entre la sección A y la sección B (ver Fig. 4), contiene 3 curvas internas muy pronunciadas entre la confluencia del río Nuevo y los límites del casco de estancia del emprendimiento “Las Barrancas”. Estas ejercen presión sobre el margen izquierdo debido a que la sección se reduce aumentando la velocidad aguas arriba produciendo erosión sobre la orilla lo que facilita que la corriente arrastre los materiales que conforman el lecho y al mismo tiempo van socavando la base de la

barranca. Estas curvas se encuentran ubicadas a una distancia de 100 m, 290 m y 610 m de la sección A, respectivamente.

Figura 3. a. Vista aérea oblicua del valle fluvial, aguas arriba del emprendimiento. **b.** Procesos de erosión lateral de las orillas (desbarrancamiento). **c.** Niveles aterrazados del río Nuevo.



El río Nuevo en este segmento presenta una pendiente igual a 0,0151 m/m (1,51%) un ancho promedio de 78 m (con máximos de 110 m) y una profundidad de valle de 16 m (ver Fig. 4). El material del fondo de canal está compuesto conforme al análisis granulométrico por partículas de diámetro medio (D50) igual a 1 mm. El avance de la erosión de márgenes determinado en las imágenes satelitales entre los años 2003 y 2022 fue de 50 m en el sector suroeste del casco de estancia, afectando la morfología del lecho y, por consiguiente, transgrediendo los límites de la propiedad (ver Fig. 4).

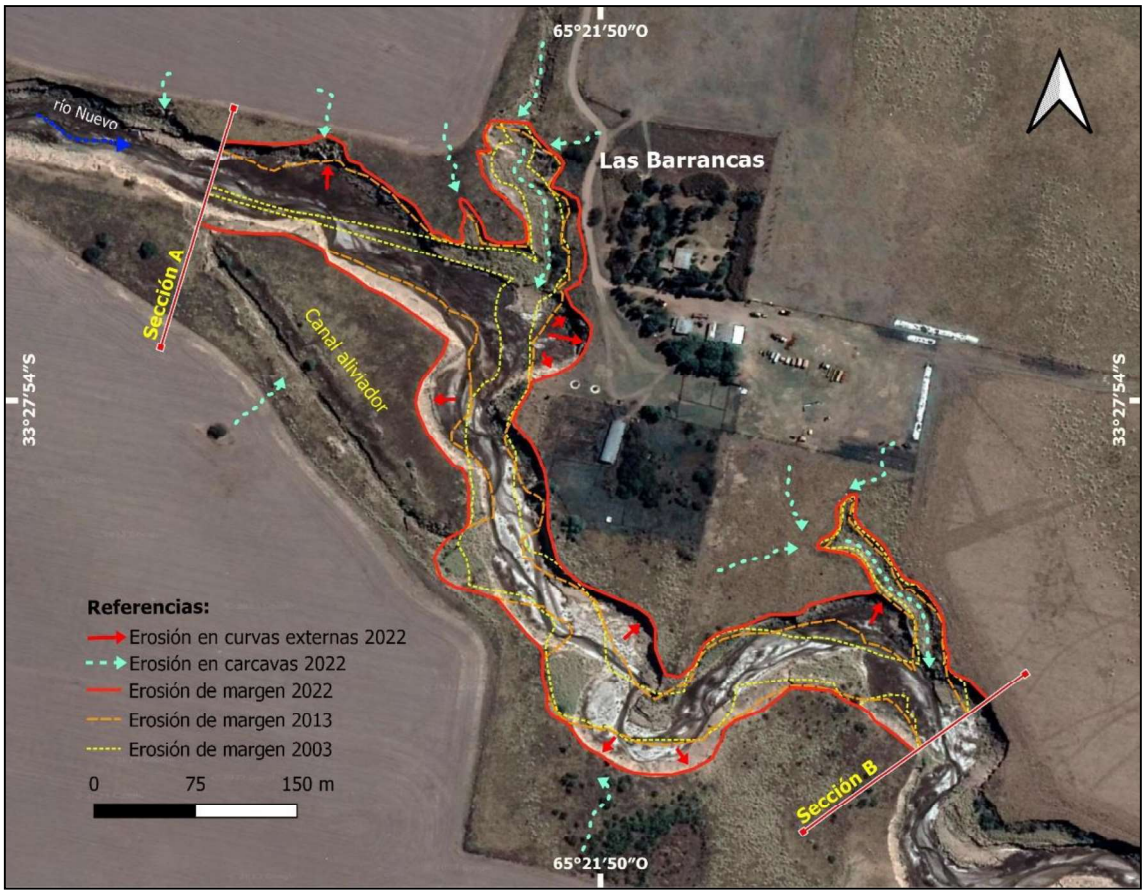


Figura 4. Mapa del avance de la erosión hídrica basado en el análisis multitemporal en base a imágenes de Google Earth.

Los eventos hidrometeorológicos de gran intensidad como los ocurridos en el año 2001, 2008 y 2015 favorecieron al incremento de procesos geomorfológicos dinámicos que aumentaron el ancho y la profundidad de las cárcavas durante estos sucesos y fue posible identificarlos en el registro histórico de lluvias de las estaciones meteorológicas. Del evento de abril de 2001 no se tienen datos en la zona de estudio, pero si se conocen sus efectos en la cuenca adyacente del río Quinto, donde se pudo registrar intensidades de 131 mm/h en la estación Virorco, 160 mm/h en la estación Carolina y 133 mm/h en la estación El Rincón, por lo que se entiende que este evento fue de características atípicas y uno de los más importantes de los últimos años.

De acuerdo con las mediciones pluviales de la estación meteorológica La Esquina (ver Fig. 2) el evento de noviembre de 2008 dejó un registro de 311 mm desde el día 23 al 28, destacándose un acumulado de 119,2 mm en una hora. Mientras que para el evento de marzo de 2015, esta estación registró un acumulado de 129,3 mm desde el 25 de febrero al 2 de marzo (REM, 2022). Según la información aportada por Defensa Civil de Villa Mercedes, ambos temporales generaron el desborde del río Nuevo interrumpiendo el tránsito en las rutas RP N°33, RN N°8 y RN N°7.

En el sitio de estudio provocó anegamientos y formación de lagunas (rectángulos azules en la Fig. 5 a) y el desarrollo de una red de drenaje asociada con el esfuerzo cortante de grandes caudales que desarrollaron surcos y cárcavas a través de procesos de colapso de taludes y cabecera que, en ocasiones fueron aprovechando la infraestructura previa (caminos, alambrados y huellas) pero también fue controlada por las condiciones geológicas del subsuelo que en algunos casos favorecen la incisión y en otros se comportan como umbrales de erosión.

El avance remontante de estas geoformas (indicadas con elipses rojos) parece estar vinculado con procesos de erosión por sufusión o *piping* (círculos verdes) como se puede observar en las Fig. 5 a y b. La evolución de cárcavas a cursos fluviales es la principal fuente de sedimentos (flechas amarillas) y el mayor proceso de degradación del suelo (flechas rojas) y puede identificarse claramente en las imágenes satelitales de los años 2003 a 2022.

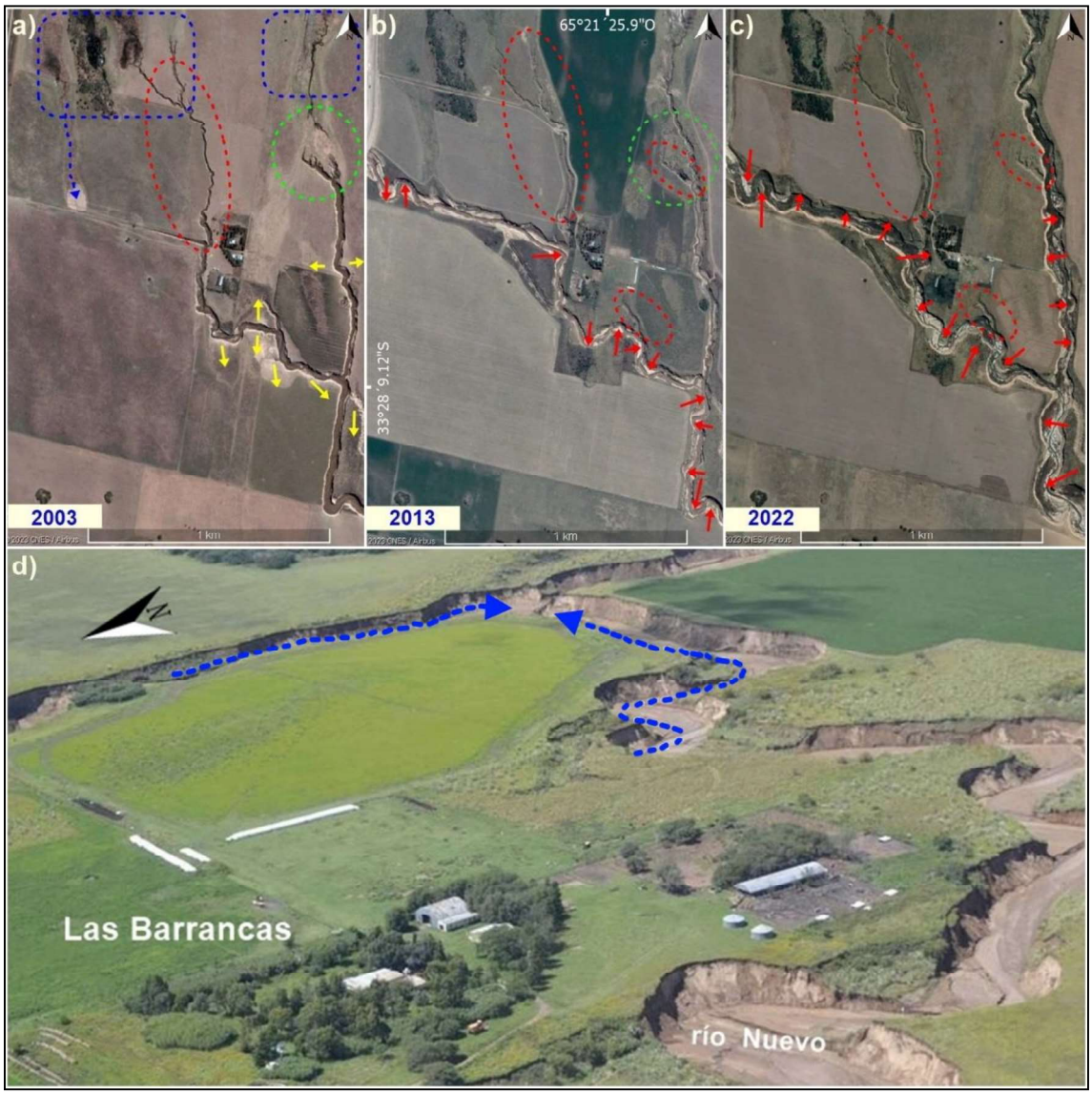


Figura 5. Evolución de los procesos erosivos en base a imágenes de Google Earth: **a.** año 2003, **b.** año 2013 y **c.** año 2022. **d.** Vista aérea oblicua del emprendimiento "Las Barrancas". Fotografía publicada por El Diario de la República, 23/06/2019. Foto cortesía del Sr. Juan Luna.

MEDIDAS DE MITIGACIÓN

En el curso fluvial del río Nuevo entre las secciones A y B, sobre la margen derecha, se recomienda realizar la construcción de un canal aliviador de crecidas de 320 m de largo que ayudará a disminuir el efecto de los caudales sobre las márgenes próximas al casco de estancia.

La rectificación de curvas de meandro y extracción (dragado y retiro) del material de arrastre para aumentar la capacidad de manejar caudales de crecidas, respetando las condiciones hidráulicas y morfológicas del cauce.

En surcos y cárcavas, realizar la revegetación en las áreas afectadas con especies autóctonas, generando una cobertura herbácea-arbustiva potente cuya función será ayudar a controlar la erosión de cabecera y taludes de las cárcavas, favorecido por el desarrollo radicular de la vegetación que generará mayor retención y estabilidad del suelo.

Por último, deben adoptarse nuevas prácticas de manejo y conservación de los suelos arenosos con poca capacidad de almacenamiento de agua, evitando las superficies descubiertas para disminuir tanto la erosión eólica como aluvial.

CONCLUSIONES

El seguimiento evolutivo de los procesos erosivos a través de imágenes satelitales y la elaboración de mapas temáticos es una importante herramienta para identificar las áreas con mayor amenaza de erosión en el emprendimiento "La Barranca".

La ocurrencia de precipitaciones intensas y/o abundantes como las ocurridas en los años 2001, 2008 y 2015 generaron grandes caudales de crecida provocando efectos negativos en el suelo del establecimiento agropecuario.

El monitoreo de cárcavas y nuevos cursos fluviales acompañado del conocimiento geológico del sector y de datos meteorológicos son de gran utilidad para establecer relaciones entre las precipitaciones y los procesos erosivos, que permitirán estimar su avance y servirán de base para el diseño de acciones destinadas a preservar el ambiente y garantizar las actividades económicas del lugar.

REFERENCIAS

Barbeito O., Beltramone C., Ambrosino S. y Contreras P. Estudio Geomorfológico de la Cuenca Del Morro. Departamento Pedernera. San Luis. 119 p. (2008).

Bernasconi, H. O., Colazo, J. C., Galván, M. J., Mercau, J. L., y Saenz, C. A. Los nuevos cursos de agua en la cuenca de El Morro: descripción del proceso y pautas para su gestión. Ediciones INTA. (2015).

Capitanelli R. y Zamorano M. Geografía de la Provincia de San Luis. Boletín de Estudios Geográficos. Instituto de Geografía Universidad Nacional de Cuyo. Vol. XIX. N°7477. Mendoza. (1972).

Collado, A. Cambio Climático, Transformaciones y Conflictos Territoriales en la Cuenca Hídrica de "El Morro", Provincia De San Luis, Argentina. XVI Encuentro de Geógrafos de América Latina. (2017).

Costa, C., A. Ortiz Suarez, R. Miro, J. Chiesa, C. Gardini, A. Carugno, G. Ojeda, P. Guerstein, G. Tognelli, P. Morla, E. Strasser y D. Martos. Hoja Geológica 3366-IV, Villa Mercedes, Provincias de Córdoba y San Luis. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR. Boletín 348. Buenos Aires. (2005).

Dueñas, D. Análisis de la Dinámica Fluvial del Río Quinto y la Incidencia Antrópica en el Tramo del Municipio de Villa Mercedes, San Luis, Argentina. Trabajo final de licenciatura. Departamento de Geología. Universidad Nacional de San Luis. 122 p., inédito. (2021).

Galván, M. J., y Collado, A. Escurrimientos hídricos superficiales en la cuenca hidrográfica de "El Morro", provincia de San Luis. Estación Experimental Agropecuaria San Luis, INTA. (2009).

Gez J. W. Geografía de la Provincia de San Luis. Tomo 2. Ed. Peuser, Buenos Aires. (1939).

González Díaz E. F. Geomorfología. En: M. Yrigoyen (Ed.). Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Luis. Relatorio 8° Congreso Geológico Argentino: 193-236. (1981).

Jobbágy E.G., M.D. Nosetto, H.O. Bernasconi, J.C. Colazo, M.J. Galván, C.A. Saenz, E.R. Colazo, C.E. Larrusse, A.A. Marchi, O.A. Barbosa, A. Giacardi, M.M. Hellmers & D.

Martínez Álvarez. Nuevos cursos de agua en la cuenca de El Morro. Descripción del fenómeno y pautas para su gestión. Informe presentado al Consejo Provincial de Ciencia, Técnica, Desarrollo e Innovación de San Luis. 21 pp. (2015).

Ley IX .939 Nro.: IX 939. Declaración de Emergencia Pública en Materia Ambiental en el ámbito de la cuenca del Morro y su área de influencia. San Luis. Sancionada el 18 de mayo de 2016. Boletín oficial, 3 de junio de 2016 Id SAIJ: NV14710. (2016).

Ley IX .939 Nro.: IX 939. Prórroga. Declaración de Emergencia Pública en Materia Ambiental en el ámbito de la cuenca del Morro y su área de influencia DECRETO 2.697/2021 LA PLATA, 4 de junio de 2021. Boletín Oficial, 14 de Julio de 2021 Vigente, de alcance general. Id SAIJ: D20210002697. (2021).

Ojeda G. y Sosa G. Tendencias Climáticas y Riesgos Geomorfológicos Asociados en la Región Central de la Provincia de San Luis. Publicación especial del Instituto de Geociencias y Medio Ambiente (INGEMA) Geomorfología y Cambio Climático, Cap. 4: 47-61. UNT. (Eds.) Dr. J.M. Sayago y Dra. M.M. Collantes. ISBN 978-987-9390-36-2. (2009).

Red de Estaciones Meteorológicas de San Luis (REM) www.clima.edu.ar

Ríos, L. Geomorfología de la subcuenca del río Nuevo, San Luis, Argentina: Implicancias sobre los depósitos de crecida y su revegetación. Trabajo final de Licenciatura. Departamento de Geología. Universidad Nacional de San Luis. 178 p., inédito. (2020).

Sáenz, C. A., Rusoci, N. E., y Colazo, J. C. Balance hídrico de diferentes escenarios en la cuenca El Morro. Ediciones INTA. (2016)

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESTACIONAL DE LAS TENDENCIAS EN foF2 Y SU RELACIÓN CON LA VARIACIÓN DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO

Trinidad Duran [a, b], Blas F. de Haro Barbas [c, d], Ana G. Elias [c, d], Yamila Melendi [a], Alfredo Juan [a, b] y Fernando S. Buezas [a, b]

[a]*Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur (UNS), ARGENTINA.*
[b]*Instituto de Física del Sur (CONICET-UNS), ARGENTINA.*
[c]*Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - FACET, Universidad Nacional de Tucumán (UNT), ARGENTINA*
[d]*INFINOA (CONICET-UNT), ARGENTINA.*

e-mail: trinidad.duran@uns.edu.ar

RESUMEN

Desde principios de la década del 90 cobró gran importancia el análisis de tendencias a largo plazo en la atmósfera superior. En particular se publicaron varios trabajos sobre tendencias en la ionosfera, la mayoría de los cuales las asocian al aumento de concentración de gases de efecto invernadero, y otros a causas naturales como variaciones a largo plazo en la actividad solar, en la actividad geomagnética y en el campo magnético intrínseco de la Tierra. La atribución de causas a estas variaciones de largo plazo sigue siendo una problemática de gran interés y complejidad, lejos aún de estar resuelta. Como aporte a esta temática se analiza la variación estacional de las tendencias en la frecuencia crítica de la capa F2, foF2, medida en estaciones de latitudes medias. Este parámetro ionosférico, de gran utilidad e importancia en aplicaciones de clima espacial y telecomunicaciones, entre otros, constituye una medida de la densidad máxima de electrones en la ionosfera. Las tendencias se estimaron a partir de los residuos de regresiones lineales múltiples entre foF2, el flujo de radiación solar en 10.7cm F10.7 como sustituto de la radiación EUV solar y el índice Ap indicador de la actividad geomagnética. La variación estacional de los valores y del signo de las tendencias, en este caso, brinda información acerca de los roles relativos de los que serían sus principales forzantes: el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero y la variación secular del campo magnético de la Tierra.

Palabras Clave: Ionósfera, foF2, Campo Geomagnético, Tendencias a largo plazo.

INTRODUCCIÓN

Se define a la ionosfera como la región de la atmósfera en la que la cantidad de iones y electrones libres es suficiente como para afectar la propagación de ondas de radio (Rishbeth and Garriott, 1969; Schunk and Nagy, 2009). Las partículas cargadas son, en su mayoría, el resultado de la interacción de la radiación solar con la atmósfera neutra que hace que algunos átomos y moléculas sean disociados en pares ión-electrón. La ionosfera se extiende desde los 50-60 km aproximadamente y continúa hasta un límite superior que en general se considera entre los 600 y 1000 km.

Particularmente, la región F2 de la ionosfera es la zona de la atmósfera con mayor densidad de iones y electrones libres. La densidad máxima de cargas, NmF2, cuya altura de pico se denomina hmF2, se relaciona directamente con la frecuencia crítica de esta capa, foF2, definida como la frecuencia más alta a la que se refleja un pulso de radio transmitido verticalmente hacia arriba por una ionosonda situada en la superficie terrestre.

La investigación de los cambios a largo plazo en la atmósfera superior se ha convertido en un tema de gran importancia en las investigaciones sobre el cambio climático global, y durante los últimos 30 años se han publicado muchos resultados (Roble and Dickinson 1989; Danilov, 2012; Danilov and Konstantinova, 2013; Laštovička, 2009, 2014; Laštovička et al, 2008, 2012, Elias et al, 2014). Laštovička et al (2012) enumeró los siguientes potenciales forzantes de las tendencias en el sistema mesosfera-termosfera-ionosfera: la actividad solar, los gases de efecto invernadero, la actividad geomagnética, el cambio secular del campo magnético principal de la Tierra, las ondas atmosféricas de la baja atmósfera y la dinámica atmosférica.

Como es de esperar, la ionosfera responde fuertemente al ciclo de actividad solar de 11 años. Cuando el Sol está en su máximo de actividad emite más radiación. Esto afecta la composición química y la estructura térmica de la atmósfera media y, posteriormente, la composición de iones. La variación de la irradiación a lo largo del ciclo solar es del orden del 0,1% cerca del pico del espectro (en el dominio visible), pero puede superar el 100% en el UV y el EUV. Existen varios índices de actividad solar, en particular en este trabajo se utilizó el índice F10.7 el cual se refiere al flujo de emisión de ondas de radio del Sol en una longitud de onda de 10,7 cm. Se mide en unidades de flujo solar (sfu, igual a 10-22 Wm-2Hz-1) y varía de ~70 sfu en un mínimo a ~230 sfu en un máximo solar. El índice F10.7 se utiliza frecuentemente debido a su alta correlación con la radiación EUV solar, y su completo y extenso registro de observación (Tapping, 1987). F10.7 ha sido medido diariamente por el Consejo Nacional de Investigación de Canadá desde 1947 y actualmente las mediciones se realizan en el Dominion Radio Astrophysical Observatory, considerándose el registro de irradiancia más largo.

Uno de los principales forzantes globales de las tendencias a largo plazo de la atmosfera superior es el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero, concretamente el CO_2 (Lastovicka et al, 2012). La concentración de CO_2 en la atmosfera terrestre ha aumentado desde la revolución industrial de ~280 a ~410 ppm en 2020, según las mediciones realizadas a nivel del suelo en Mauna Loa, Hawai, informadas por el Global Monitoring Laboratory de NOAA. Como menciona el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero han causado un calentamiento global de la troposfera al atrapar la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra. Por encima de la troposfera, en la atmósfera media y superior, el aumento de la concentración de CO_2 tiene un efecto contrario. Roble and Dickinson (1989) fueron los primeros en cuantificar este efecto prediciendo un enfriamiento y contracción de la ionosfera. Si la concentración de CO_2 se duplica, según el modelo teórico utilizado por estos autores, cabe esperar un enfriamiento de 30-40 K en la termosfera junto con una disminución de la densidad del aire, una disminución de 15-20 km en hmF2, y una disminución de foF2 de 0,5 MHz a nivel mundial. En un trabajo más reciente de Solomon et al (2018) se utiliza un modelo más complejo donde se aplica una variación real de CO_2. Estos resultados también predicen un decrecimiento de hmF2 y un decrecimiento de 1.2% por década en NmF2, lo que implica un decaimiento de 0.06% por año en foF2.

La respuesta ionosférica a la actividad geomagnética, otro de los forzantes de tendencias en la atmosfera superior, es muy compleja debido a los numerosos procesos físicos involucrados. Durante las tormentas geomagnéticas, una gran cantidad de energía se deposita en la termosfera en latitudes altas y puede contribuir a una disminución o aumento en la concentración de electrones, lo que implica una disminución o aumento de

foF2 (tormenta negativa o positiva, Prolss, 1993). Además, la interacción de las partículas energéticas con la atmósfera y el flujo de corrientes derivadas de la convección del plasma en la ionosfera pueden causar perturbaciones en el campo magnético medido cerca de la superficie. En los estudios de Danilov and Mikhailov (1999) y Mikhailov and Marin (2000) se sostiene que la variación a largo plazo de la actividad geomagnética sería responsable de parte de las tendencias ionosféricas observadas sobre todo a latitudes altas y en menor medida en baja latitud. Laštovička (2013) plantea que la actividad geomagnética controló las variaciones a largo plazo de foF2 durante el siglo XX, pero que ya no es el caso. Sin embargo, Perrone and Mikhailov (2016), afirman que el control geomagnético sobre los parámetros foF1 (frecuencia crítica de la capa F1) y foF2 es válido para principios del siglo XXI, incluido el período de mínimo solar en 2007-2009.

Dado que la ionosfera está formada por partículas cargadas, cabe esperar que responda a las variaciones seculares del campo magnético de la Tierra. Foppiano et al (1999) fueron de los primeros en sugerir que las variaciones seculares del campo geomagnético serían responsables, junto el aumento del CO_2, de las tendencias observadas en la ionosfera. Esta idea fue retomada luego por otros autores (Elias and Adler, 2006; Cnossen and Richmond, 2008; Yue et al, 2008; Elias, 2009) quienes profundizaron su estudio. El propio cambio del campo y su impacto en la ionosfera tienen un carácter regional, siendo positivo en algunas regiones, negativo en otras y nulo en el resto. Puede afectar a la ionosfera a través de cambios en la inclinación magnética (I) combinado con vientos neutros y procesos de difusión. Durante la noche, el viento termosférico horizontal (u) que sopla, en teoría, hacia el ecuador arrastra los iones y electrones a lo largo de las líneas del campo geomagnético a una velocidad vertical dada por (Rishbeth, 1998)

$$V_{Bz} = \vec{\boldsymbol{u}} \cdot sen(I) \cdot cos(I) \qquad (1)$$

Esta velocidad vertical eleva la capa hacia regiones de menor recombinación aumentando la densidad de electrones de la capa F2, por lo tanto, aumentan los parámetros ionosféricos fof2 y hmF2 (Fig. 1a). Efectos opuestos son producidos durante el mediodía, cuando el viento neutro se dirige, en teoría, hacia el polo de manera que las cargas se ven obligadas a bajar a lo largo de las líneas de campo hacia regiones de mayor recombinación, por consiguiente, la capa desciende y la densidad de carga también (Fig. 1b). Como la componente vertical de la velocidad es función de la inclinación, variaciones en este parámetro del campo magnético generará sin dudas variaciones tanto en hmF2 como en foF2, cuyo signo y magnitud dependerá de la hora local y de la ubicación geográfica, respectivamente. Por otro lado, el patrón de vientos neutros también presenta variabilidad estacional, lo que agregaría variaciones en las tendencias de la ionosfera a lo largo de los meses.

Como se mencionó, existen importantes variaciones temporales y espaciales en la capa ionosférica F. Aunque se ha estudiado durante décadas, las tendencias estacionales de la ionosfera siguen siendo una de las cuestiones que no se han resuelto del todo, en parte debido a las limitaciones de las técnicas de observación y a la desigual cobertura de los datos. Danilov (2015) estudió la dependencia de las tendencias de foF2 con la hora local y la estación del año. En ese trabajo se mostró que las tendencias de foF2 decrecen por la noche y durante el día de verano, pero son negativas y más intensas durante el día en meses de invierno.

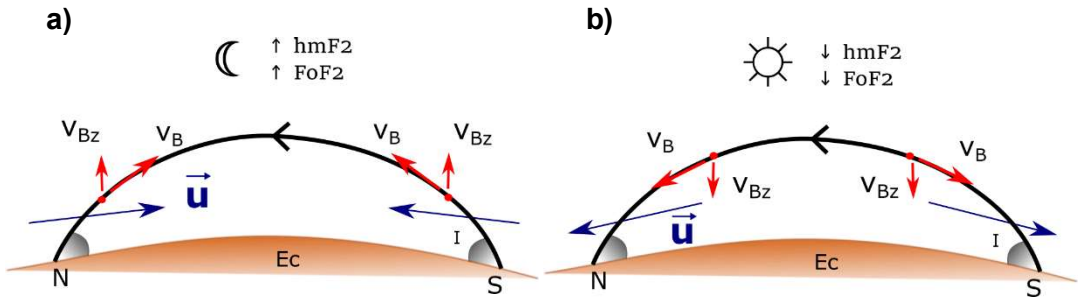


Figura 1. a. El viento horizontal termosférico (**u**) sopla hacia el ecuador por la noche, impulsa los iones y electrones a lo largo de las líneas del campo geomagnético a velocidad V_{Bz}. Esta deriva eleva la altura de pico y la densidad de electrones de la capa F2. **b.** Durante el mediodía se espera el efecto opuesto.

DATOS Y METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizaron para cada hora del día y para cada mes las medianas mensuales de foF2 de dos estaciones australianas: Canberra (35.7°S, 149.1°E) y Mundaring (31.5°S, 116.1°E) (Fig. 2). El periodo de datos disponible abarca desde 1950 a 2013, es decir, durante los ciclos solares 20 a 23. Esta información se obtuvo de la base de datos del World Data Center (https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/4). Para el análisis, también se utilizaron datos mensuales de F10.7 y el índice geomagnético Ap.

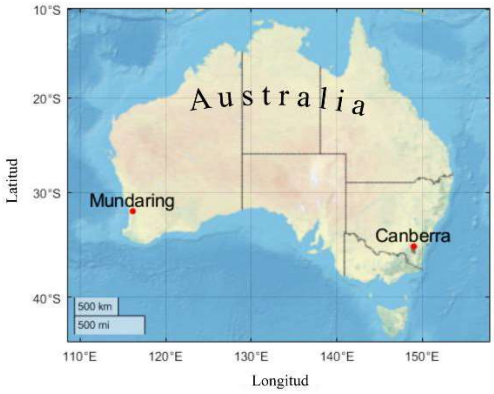


Figura 2. Ubicación de las estaciones ionosféricas de Canberra y Mundaring

La atmósfera, y especialmente la termosfera, responde fuertemente a los cambios en la actividad solar y geomagnética. Al estudiar las variaciones a largo plazo de los parámetros ionosféricos, como foF2, es necesario eliminar los efectos de la actividad solar, que son los responsables del 90%, o más, de la variabilidad ionosférica (Chen et al, 2012). Por ello, se filtraron ambos efectos, tanto de actividad solar como geomagnética, estimando los residuos (foF2res) de la regresión múltiple entre los valores experimentales (foF2exp) de foF2, el proxy solar F10.7 y el índice Ap, es decir

$$foF2_{res} = foF2_{exp} - (a + b \cdot F10.7 + c \cdot Ap) \quad (2)$$

donde a, b y c son constantes evaluadas a partir de cuadrados mínimos. Este es un método razonable debido al alto coeficiente de correlación lineal entre foF2 y los indicadores de

 ISBN: 978-987-1323-89-0

actividad solar que, en general, está por encima de 0,9. La tendencia α de foF2 se estima finalmente a partir de la regresión lineal entre la serie de residuos de foF2 y el tiempo:

$$foF2_{res} = \alpha \cdot t + \beta \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, se promediaron los datos experimentales de foF2 de Canberra y Mundaring a lo largo de todo el período de tiempo para cada hora del día y para cada mes obteniendo los resultados mostrados en la Fig. 3. Como era de esperar, para ambas estaciones se obtuvieron máximos de ionización durante el mediodía local entre las 12 y 15 hs representados por valores de foF2 cercanos a 9 MHz, mientras que los mínimos se alcanzan durante la noche entre las 02 y 05 hs aproximadamente, con valores de foF2 cercanos a 4 MHz abarcando los meses de invierno (junio, julio, agosto). Una peculiaridad para ambas estaciones es que los máximos son más pronunciados durante los equinoccios, en particular el equinoccio de marzo-abril.

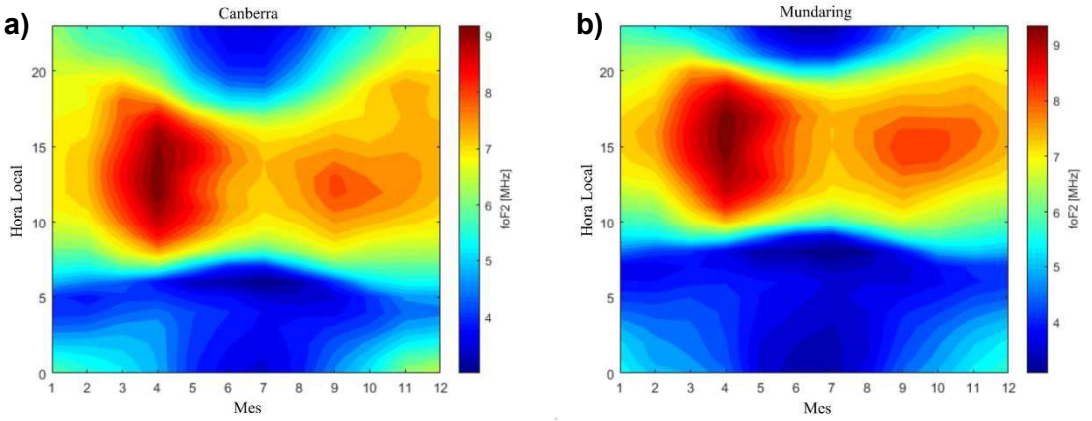


Figura 3. Promedio de foF2 [MHz] a lo largo del período completo de datos (1950-2013) para cada hora del día y para todos los meses del año. **a.** Canberra. **b.** Mundaring.

Para estimar el efecto que tendría el aumento de la concentración CO_2 sobre la tendencia a largo plazo en la capa ionosférica F2 se tomó como referencia el valor predicho por Solomon et al (2018), de modo que se aplicó un decaimiento de 0.06% anual a la frecuencia crítica promediada. Esto dio como resultado tendencias de foF2 negativas para todas las horas y todos los meses y son más intensas (-0.0055 MHz/año) durante el mediodía en los equinoccios, lo que es lógico porque es donde ocurre el máximo de foF2 para ambas estaciones (Fig. 4). Estas tendencias calculadas están de acuerdo cualitativamente con las consecuencias esperadas por el aumento de concentración de gases de efecto invernadero y con la hipótesis del enfriamiento y contracción de la atmósfera superior.

Sin embargo, las grandes diferencias en las tendencias observadas por diversos autores en hmF2 y foF2 de un lugar a otro sugieren que no pueden explicarse únicamente por los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero, ya que entonces se esperarían tendencias globales mucho más uniformes. Por lo tanto, se han propuesto hipótesis alternativas para explicar las tendencias ionosféricas observadas, como los cambios a largo plazo en la actividad geomagnética (Danilov y Mikhailov, 2001;

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Mikhailov, 2006) y los cambios a largo plazo en el campo magnético de la Tierra (Foppiano et al, 1999; Elias y De Adler, 2006).

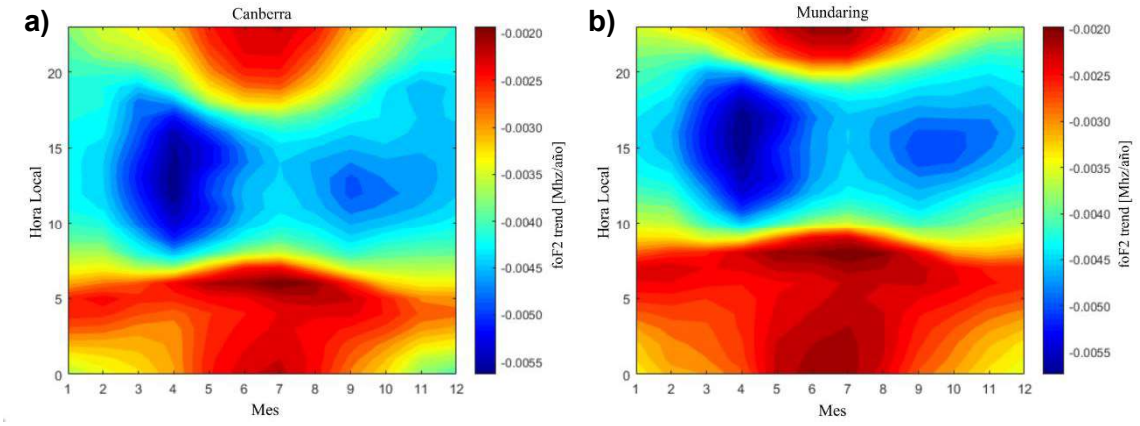


Figura 4. Tendencia esperada en fof2 [MHz/año] debido al aumento de CO_2. **a.** Canberra. **b.** Mundaring.

Con el fin de estudiar el efecto de las variaciones a largo plazo del campo geomagnético sobre la ionósfera se realizó un análisis cualitativo a través del factor sin(I)cos(I). Los valores de I se obtuvieron mediante el modelo International Geomagnetic Reference Field (IGRF) (Alken et al, 2021). La Fig. 5 muestra la variación temporal del factor sen(I)cos(I) y se observa un cambio de pendiente a partir de ~1990 para Canberra y Mundaring.

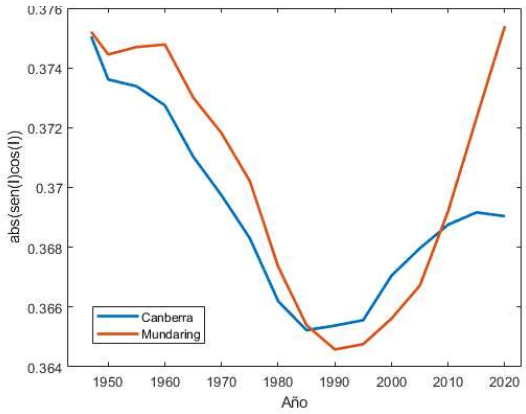


Figura 5. Variación del valor absoluto del factor sen(I)cos(I) a lo largo de los años para Canberra (azul) y Mundaring (rojo)

El cálculo del factor geomagnético combinado con el patrón de vientos neutros termosféricos obtenidos mediante el modelo HWM-14 (Drob et al, 2015) permite evaluar la componente vertical de la velocidad V_{Bz} de iones y electrones dada por la ecuación (1). Esta velocidad se promedió durante del período 1950-2013 y el resultado se graficó en función de los meses y la hora local (Fig. 6). Se pueden apreciar valores positivos de V_{Bz} durante la noche con máximos de 40 m/s en verano y valores negativos durante el día intensificados en los meses de invierno alcanzando valores de -20 m/s. Estos valores de V_{Bz} positivos en la noche y negativos durante el día contribuirían a un aumento o disminución de foF2, respectivamente, de acuerdo con la teoría de Rishbeth (1998). Si bien se consideró un modelo de vientos constante a lo largo de los años, tanto la

componente meridional como la zonal varían estacionalmente, por lo tanto, también podría generar una variación estacional en la tendencia de foF2.

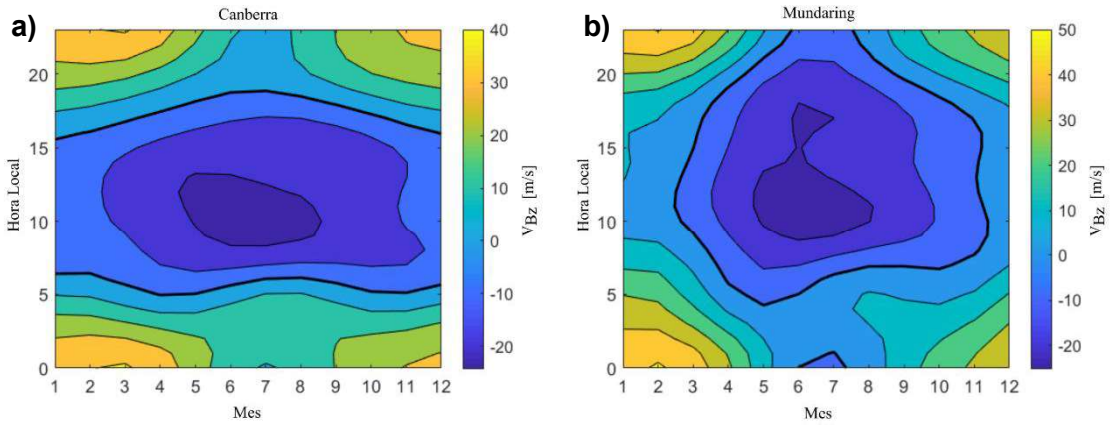


Figura 6. Componente vertical de la velocidad V_{Bz} [m/s] de partículas cargadas en función de la hora local y los meses del año. **a.** Canberra. **b.** Mundaring

Luego de analizar las tendencias esperadas en foF2 debido a ambos efectos por separado, tanto del aumento de CO_2 como a variaciones del campo geomagnético combinadas con la distribución de vientos neutros, se calcularon las tendencias en la frecuencia crítica a partir de los datos experimentales tomados por ionosondas de Canberra y Mundaring. Primero se filtró la mayor fuente de variabilidad de los datos asociada a la actividad solar y geomagnética estimando los residuos (foF2res) mediante la regresión lineal múltiple dada por la ecuación (2). La tendencia α de foF2 se estima finalmente a partir de la regresión lineal entre la serie de residuos de fof2 y el tiempo como en la ecuación (3).

La Fig. 7 muestra los mapas de contorno de las tendencias, en función de los meses y horas del día, en los residuos foF2 [MHz/año] durante todo el período de la serie de datos 1950-2013 y los dos subperíodos 1950-1990 y 1991-2013. En general, para el período completo (Fig. 7a) estas tendencias alcanzan sus valores máximos positivos cercanos a 0.005 MHz/año alrededor de los meses de invierno en el caso de Mundaring y acotándose únicamente a los meses de abril-mayo en el caso de Canberra. Para el resto de los meses se obtuvieron tendencias nulas y negativas de hasta -0.015 MHz/año. Si ahora, en cambio, se observan las tendencias calculadas para los períodos de tiempo antes y después de 1990 (Fig. 7b y 7c respectivamente) se puede notar que las tendencias cambian de signo entre la figura b y c para cada hora del día y para todos los meses tanto para Canberra como para Mundaring. Este resultado, posiblemente está relacionado con el cambio en la pendiente del factor sen(I)cos(I) a partir de 1990 analizado anteriormente. Para explorar esta hipótesis se plantea comparar estos resultados cualitativamente con las tendencias de a componente vertical de la velocidad del viento para los mismos períodos de tiempo presentados en la Fig. 8.

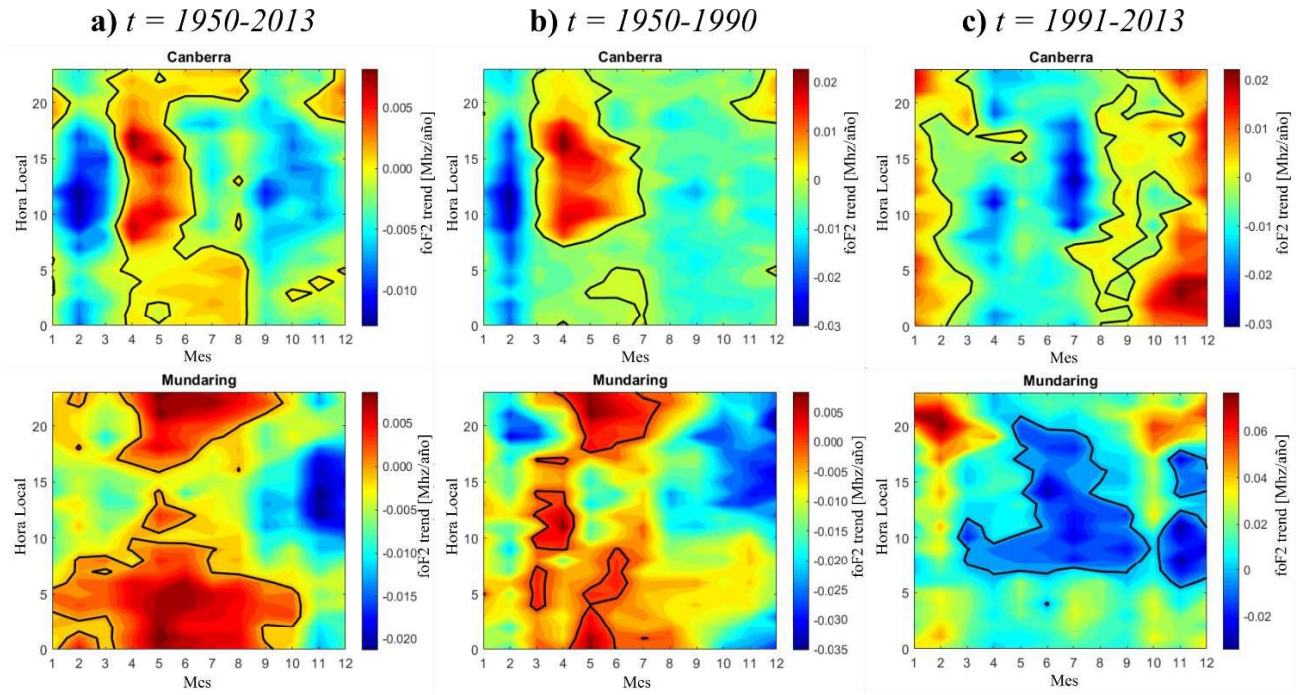


Figura 7. Mapas de contornos de las tendencias [MHz/año] estacionales y diurnas de los residuos de foF2 para Canberra (arriba) y Mundaring (abajo). **a.** Durante todo el período de la serie de datos (1948-2013) y para los dos subperíodos **b.** (1950-1990) y **c.** (1991-2013). La línea negra indica tendencia cero.

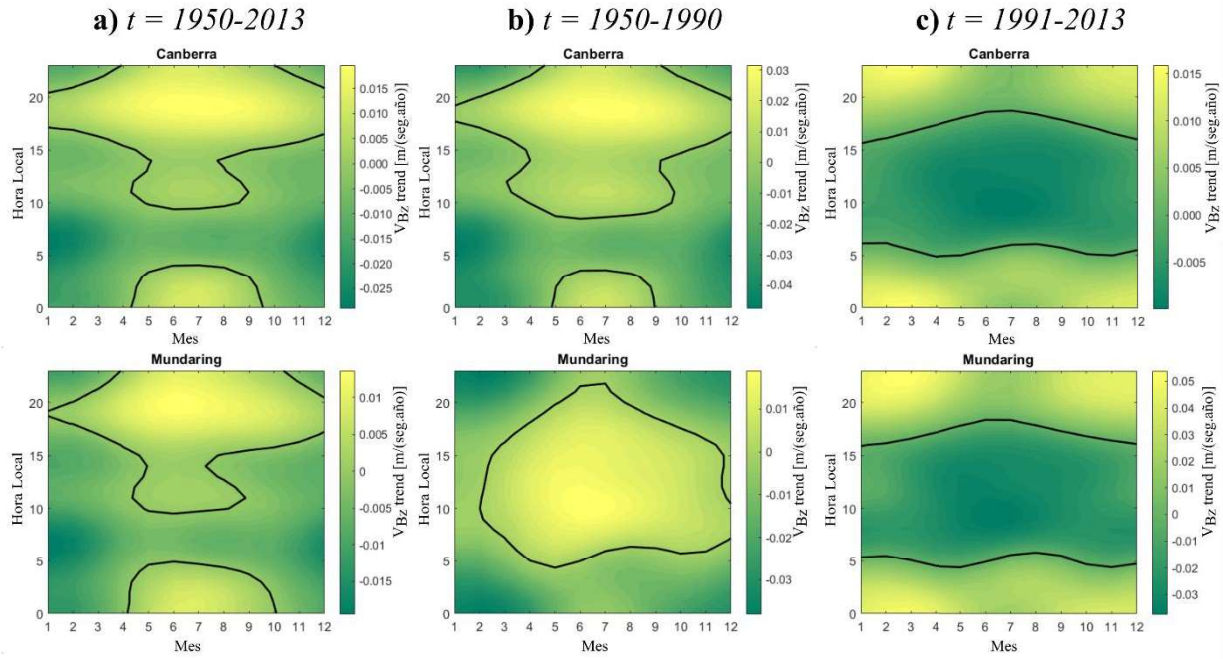


Figura 8. Mapas de contornos de las tendencias en la velocidad vertical V_{Bz} [m/(seg.año)] estacionales y diurnas para Canberra (arriba) y Mundaring (abajo). **a.** Durante todo el período de la serie de datos (1948-2013) y para los dos subperíodos **b.** (1950-1990) y **c.** (1991-2013). La línea negra indica tendencia cero.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Por ejemplo, centremos nuestra atención en las tendencias calculadas para Mundaring en el período completo (Fig. 7a y 8a). Se observa que durante el mediodía las tendencias de foF2 negativas se corresponden con tendencias de V_{Bz} negativas, es decir la variación del campo magnético combinada con el viento termosférico diurno contribuye en el descenso de la capa F2 provocando tendencias más negativas en foF2. Inversamente, durante la noche, sobre todo en los meses de invierno, las tendencias positivas en foF2 se ven justificadas ampliamente por las tendencias positivas en la velocidad V_{Bz}.

Del mismo modo es posible comparar las tendencias de Mundaring calculadas hasta 1990 de las Fig. 7b y 8b. Las tendencias de foF2 negativas durante la noche se corresponden con las tendencias negativas más acentuadas de V_{Bz}. Mientras que las tendencias durante el mediodía, son positivas en el caso de V_{Bz} lo que explica tendencias positivas o cercanas cero en foF2 en ese rango de horario. La misma correlación entre foF2 y V_{Bz} se observa para las Fig. 7c y 8c donde se considera el periodo posterior a 1990.

Este análisis puede aplicarse sobre las tendencias calculadas para Canberra, pero no es tan directa la correlación. Probablemente la contribución y la interrelación de los diversos forzantes que generan tendencias a largo plazo en los parámetros ionosféricos para esta estación sea más compleja y es difícil explicarla mediante estos modelos en donde se analizan los forzantes individualmente. De todos modos, aunque el acuerdo no es ideal si observamos la estructura fina de la variación estacional y horaria de las tendencias, existe un patrón general que parece indicar que el campo magnético combinado con el viento termosférico neutro podría explicar esta variabilidad.

CONCLUSIONES

Desde el inicio de la era espacial, se han detectado cambios a largo plazo en la atmósfera media y superior. En general, la temperatura y la densidad han disminuido, provocando la contracción de la ionósfera. Sin embargo, en la capa ionosférica F los registros de las mediciones a largo plazo muestran grandes diferencias en las tendencias dependiendo de la ubicación, la estación y la hora local.

En este trabajo se analizó la variación estacional y diurna de las tendencias a largo plazo en el parámetro ionosférico foF2 a partir de datos experimentales de dos estaciones de latitudes medias: Canberra y Mundaring. La variación estacional tanto de los valores como del signo de las tendencias proporciona información sobre los roles relativos de lo que serían sus principales forzantes, en este caso, el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y la variación secular del campo geomagnético.

En primer lugar, se estimaron las tendencias que provocaría el efecto del CO_2 en la ionósfera. Las tendencias de foF2 negativas obtenidas en este caso, en principio, estarían de acuerdo con el enfriamiento y la contracción en la alta atmósfera propuesta por otros autores como consecuencia al aumento de gases de efecto invernadero. A pesar de ello, si se compara el resultado con las tendencias de foF2 calculadas a partir de los datos experimentales, estas últimas superan el 0.06% por año predicho por tal efecto. Estas diferencias en las tendencias observadas sugieren que no pueden explicarse únicamente por este proceso.

Consecuentemente, se estudió la respuesta esperada en la ionosfera debido a las variaciones seculares del campo magnético de la Tierra. Para ello se correlacionó la tendencia experimental de foF2 con la tendencia en la deriva vertical de la capa F provocada por cambios en la inclinación magnética ligada al patrón de vientos

termosféricos. Para el período completo 1950-2013 se observó que durante el mediodía las tendencias de V_{Bz} negativas contribuyen en el descenso de la capa F2 intensificando las tendencias de foF2 negativas. Inversamente, durante la noche, sobre todo en los meses de invierno, las tendencias positivas en foF2 se ven justificadas ampliamente por las tendencias positivas en la velocidad vertical. Luego, se analizaron los resultados para los períodos de tiempo antes y después de 1990 y se notó una inversión de signo en las tendencias de foF2 tanto para Canberra como para Mundaring. Este comportamiento, está fuertemente relacionado con el cambio en la pendiente del factor sen(I)cos(I) involucrado en el cálculo de la velocidad vertical.

Al parecer los cambios en el campo magnético permiten explicar algunos patrones de variación estacional y diaria en los valores de tendencia, incluso la presencia de tendencias positivas y un mayor rango de variación. Los cambios en la velocidad vertical resultaron ser una causa importante de las tendencias observadas a largo plazo, pero aun así no las resuelve completamente. Esto indica que hay otros factores importantes y complejos que también desempeñan un papel importante.

En general, podemos concluir que las tendencias a largo plazo probablemente no están causadas por un solo proceso, sino más bien por una combinación de ellos, incluyendo los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero, en particular el CO_2, los cambios en el campo magnético, y posiblemente otros cambios a largo plazo, por ejemplo, en la actividad solar y geomagnética, que no fueron considerados aquí. La contribución y la interrelación de los diversos forzantes que generan tendencias a largo plazo en los parámetros ionosféricos es muy compleja y es necesario abordarla considerando varios procesos simultáneamente.

REFERENCIAS

Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al. (2021) International Geomagnetic Reference Field: the 13th generation. Earth Planets Space 73, 49.

Chen, Y., Liu, L., & Wan, W. (2012). The discrepancy in solar EUV-proxy correlations on solar cycle and solar rotation timescales and its manifestation in the ionosphere. Journal of Geophysical Research, 117, A03313. doi:10.1029/2011JA017224.

Cnossen, I., & Richmond, A. D. (2008). Modelling the effects of changes in the Earth's magnetic field from 1957 to 1997 on the ionospheric hmF2 and foF2 parameters. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 70, 1512–1524. doi: 10.1016/j.jastp.2008.05.003.

Danilov, A.D. (2012). Long-Term Trends in the Upper Atmosphere and Ionosphere (a Review), Geom. Aeron., 52, 271-291.

Danilov, A.D. (2015) Seasonal and diurnal variations in foF2 trends. J. Geophys. Res. Space Phys, 120, 3868–3882.

Danilov, A.D.; Konstantinova, A.V. (2013) Behavior of the ionospheric F2 layer at the turn of the centuries. Critical frequency. Geom. Aeron., 53, 343–355.

Danilov, A.D., Mikhailov, A.V. (1999). Spatial and seasonal variations of the foF2 long-term trends. Ann. Geophys.-Atmos. Hydrosph. Space Sci. 17 (9), 1239-1243.

Danilov, A.D., Mikhailov, A.V. (2001). F2-layer parameters long-term trends at the Argentine Islands and Port Stanley stations. Ann. Geophys. 19 (3), 341-349.

Drob, D. P., Emmert, J. T., Meriwether, J. W., Makela, J. J., Doornbos, E., Conde, M., et al. (2015). An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere. Earth and Space Science, 2(7), 301–319. doi: 10.1002/2014EA000089

Elias A. G (2009). Trends in the F2 ionospheric layer due to long-term variations in the Earth's magnetic field, J. Atmos. Solar Terr. Phys. 71 1602–1609

Elias AG, Adler NO. (2006) Earth magnetic field and geomagnetic activity effects on long term trends in the F2 layer at mid-high latitudes. J Atmos Solar Terr Phys 68:1871–1878

Elias, A. G., de Haro Barbas, B. F., Shibasaki, K., & Rodriguez de Souza, J. (2014). Effect of solar cycle 23 in foF2 trend estimation. Earth, Planets and Space, 66, 111. doi: 10.1186/1880-5981-66-111.

Foppiano, A.J., Cid, L., Jara, V., (1999). Ionospheric long-term trends for South American mid-latitudes. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 61, 717–723.

IPCC (2014), Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151pp.

Laštovička, J. (2009), Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 71(14–15), 1514–1528

Laštovička, J. (2013a). Trends in the upper atmosphere and ionosphere: Recent progress. J. Geophys. Res. Space Phys., 118, 3924–3935, doi:10.1002/jgra.50341.

Laštovička, J. (2014), Trends in the upper atmosphere–ionosphere system—Progress over 2012–2014, paper presented at 8th IAGA/ICMA/ CAWSES Workshop on Long-Term Changes and Trends in the Atmosphere, Int. Assoc. of Geomagn. Aeron., Cambridge, U. K., 27–31 July.

Laštovička, J., Akmaev, R.A., Beig, G., et al, (2008). Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere. Ann. Geophys. 26 (5), 1255-1268.

Laštovička, J., S. C. Solomon, and L. Qian (2012), Trends in the neutral and ionized upper atmosphere, Space Sci. Rev., 168, 113, doi:10.1007/s11214-011-9799-3

Mikhailov, A. V. (2006), Trends in the ionospheric E-region, Phys. Chem. Earth., 31, 22–23

Mikhailov, A.V., Marin, D., (2000). Geomagnetic control of the foF2 long-term trends. Annales Geophysicae 18, 653–665.

Perrone, L.; Mikhailov, A.V. (2016) Geomagnetic control of the midlatitude foF1 and foF2 long-term variations: Recent observations in Europe. J. Geophys. Res. Space Phys., 121, 7183–7192

Prolss, G.W., (1993). On explaining the local time variation of ionospheric storm effects. Annales Geophysicae 11, 1–9.

Rishbeth, H. (1998). How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 60, 1385–1402. doi: 10.1016/S1364-6826(98)00062-5.

Rishbeth, H., and Garriott, O. K. (1969). Introduction to Ionospheric Physics. Int. Geophys. Ser. Vol. 14. Academic Press, New York.

Roble and Dickinson (1989). How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and lower thermosphere?, Geophysical Research Letters, 16, 1441–1444

Schunk, R.W. & A.F. Nagy (2009), Ionospheres. Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 628 pp.

Solomon, S. C., Liu, H.-L., Marsh, D. R., McInerney, J. M., Qian, L., & Vitt, F. M. (2018). Whole atmosphere simulation of anthropogenic climate change. Geophysical Research Letters, 45, 1567–1576

Tapping, K.F., (1987). Recent solar radio astronomy at centimeter wavelengths—the temporal variability of the 10.7-cm flux. Journal of Geophysical Research 92, 829–838.

World Data Centre for Ionosphere and Space Weather (https://wdc.nict.go.jp/IONO/wdc/index.html)

Yue, X., Liu, L., Wan, W., Wei, Y., & Ren, Z. (2008). Modeling the effects of secular variation of geomagnetic filed orientation on the ionospheric long-term trend over the past century. Journal of Geophysical Research, 113, A10301. doi: 10.1029/2007JAO12995.

BIODEGRADACION DE XENOBIOTICOS

José A. Gálvez, José A. Cantero, Sergio A. Vardaro, Cecilia López, Pablo Salomón

Bioprocesos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo , ARGENTINA

e-mail: jose.galvez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RESUMEN

Los compuestos xenobióticos persisten en el ambiente debido a su alta estabilidad termodinámica, son de origen antropogénicos son resistentes a la degradación natural y ocasionan impactos negativos en los ecosistemas. Una gran variedad de estos compuestos proviene de diferentes procesos industriales y son causa de preocupación por sus efectos carcinogénicos, mutagénicos, teratogénicos y bioacumulables. Debido a estas características particulares se han ensayado e implementado diferentes estrategias para disminuir sus efectos. La biodegradación de estos compuestos consiste en un proceso natural llevado a cabo por microorganismos que los emplean como una forma de supervivencia, ya sea transformándolos o mineralizándolos. Las rutas metabólicas transforman los contaminantes por medio de sistemas específicos disminuyendo los efectos tóxicos y contaminantes. La degradación de xenobióticos depende de las enzimas intervinientes para degradar substratos inusuales. Las reacciones ocurren de manera intracelular y son procesos oxidativos que se dan por la activación e incorporación de oxígeno, catalizados por enzimas, sin embargo, cuando se pretende remover compuestos xenobióticos en condiciones anaerobias, es posible que los microorganismos realicen respiración a partir de otros aceptores de electrones. La degradación anaerobia llega a ser muy importante, especialmente para llevar a cabo la mineralización de los xenobióticos con poca volatilidad, es decir, de estructuras y pesos más complejos. En algunos casos, la degradación de algunos compuestos no ocurre de manera aerobia si no existió un proceso anaeróbico previo. La biodegradación de compuestos xenobióticos se ve afectada por una gran cantidad de factores ambientales y nutricionales, por ello es que, para optimizar estos procesos se implementan Ensayos de Tratabilidad en condiciones de laboratorio de manera de obtener un tratamiento efectivo y de bajo costo hasta alcanzar las mejores tasas de degradación, de acuerdo al tipo y concentración del xenobiótico y microorganismos que participen.

Palabras Clave: Degradación, Tratabilidad, Mineralización, Xenobióticos, Recalcitrantes.

INTRODUCCIÓN

Nuestro organismo es un complejo sistema biológico que está organizado en varios niveles, desde molecular-celular hasta tejidos y órganos. Se trata de un sistema abierto que intercambia materia y energía en forma constante con su medio ambiente a través de reacciones bioquímicas en equilibrio dinámico. Las innumerables sustancias químicas, con las que toma contacto nuestro organismo, pueden ingresar por ingestión, inhalación o absorción a través de la piel y mucosa intestinal. Estas sustancias pueden o no causar daño dependiendo de su concentración y su transformación en los tejidos las que han sido denominadas Xenobióticos. El término Xenobiótico significa un compuesto químico extraño a nuestro organismo que ha ingresado por cualquiera de las vías señaladas. El objetivo de esta revisión es analizar la biodegradación de estos compuestos que consiste en procesos naturales llevados a cabo por microorganismos que emplean los contaminantes como una forma de supervivencia, ya sea transformándolos o mineralizándolos. Conocer las rutas metabólicas que transforman los contaminantes por medio de sistemas específicos disminuyendo los efectos tóxicos y contaminantes. La degradación de xenobióticos depende de las enzimas intervinientes para degradar

substratos inusuales. Las reacciones ocurren tanto de manera intracelular como extracelular a partir de exoenzimas y son procesos oxidativos que se dan por la activación e incorporación de oxígeno, catalizados por enzimas, sin embargo, cuando se pretende remover compuestos xenobióticos en condiciones anaerobias, es posible que los microorganismos realicen respiración a partir de otros aceptores de electrones.

Los ecosistemas de agua dulce, componen sólo el 2,6 % del total de agua distribuida en el mundo (Kalff, 2002). Estos ambientes constituyen un recurso vital para los seres humanos y para el conjunto de organismos que viven asociados a ellos. Sin embargo, desde el inicio de los procesos de industrialización y la profundización de las actividades agropecuarias, la contaminación química se ha incrementado de manera vertiginosa, generando en las últimas décadas preocupantes riesgos para la salud humana y ambiental. En este contexto, a todos aquellos compuestos o sustancias abióticas sintetizadas artificialmente por el hombre, o cuya concentración en el ambiente supera los valores naturales como consecuencia de las actividades antropogénicas, se las han denominado, en sentido amplio**,** xenobióticos (Repetto, 1995). A partir del reconocimiento de los riesgos generados por dichos compuestos y la necesidad de evaluar los efectos negativos a mediano y largo plazo, surge la ecotoxicología como rama interdisciplinaria entre la ecología y la toxicología, entre otras. Su principal objetivo refiere al estudio de los efectos tóxicos de los químicos y otros agentes antropogénicos sobre el ecosistema. A fin de cuantificar las concentraciones de estos agentes y predecir los posibles daños a corto y largo plazo, inicialmente se emplearon métodos analíticos puramente químicos, que permitieron la identificación y cuantificación individual de sustancias como indicadores de fenómenos globales de alteración ambiental , sin embargo, investigaciones sucesivas permitieron reconocer que tales métodos no mostraban resultados suficientemente representativos de la problemática ambiental, debido al reconocimiento de la existencia de contaminantes cada vez más diversificados y de reacciones negativas a concentraciones más bajas que las esperables. A partir de entonces, la búsqueda de herramientas metodológicas adecuadas, sea por la representatividad de los procesos naturales, por su sensibilidad o facilidad de empleo, constituye uno de los principales lineamientos de la ecotoxicología actual (Rand y Petrocelli, 1985).

La concentración de compuestos xenobióticos se ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas debido a los productos provenientes de diferentes procesos industriales. Los compuestos xenobióticos son causa de preocupación principalmente por sus efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos y por sus características bioacumulables y biomagnificantes, por ello se han buscado diferentes estrategias para disminuir estos efectos. La degradación de compuestos xenobióticos es una estrategia usada ampliamente, consiste en un proceso natural llevado a cabo por diversos microorganismos que emplean dichos compuestos como una forma de supervivencia. A partir del reconocimiento de los riesgos generados por dichos compuestos y la necesidad de evaluar los efectos negativos a mediano y largo plazo, surge la ecotoxicología como rama interdisciplinaria entre la ecología y la toxicología, entre otras. Su principal objetivo refiere al estudio de los efectos tóxicos de los químicos y otros agentes antropogénicos sobre el ecosistema.

CLASIFICACIÓN, TIPOS Y PROPIEDADES DE XENOBIOTIOS

Los contaminantes pueden provenir de fuentes de origen natural o antropogénica, distribuyéndose en las aguas, suelos y aire; siguiendo lo que se conoce como la ruta del tóxico e ingresan a los organismos a través de las vías de exposición. Los contaminantes

tóxicos de origen antropogénico, se conocen como xenobióticos, los cuales pueden interactuar con el ambiente y el hombre, bioacumulándose en los organismos y biomagnificándose en la cadena trófica, lo cual dependerá de las características del tóxico. "Un Xenobiótico es una sustancia, en principio, externa de muy diversos tipos que puede modificar la estructura y la función de nuestras capacidades funcionales de los tejidos o de las células, ya sea beneficioso o perjudicial. Los xenobióticos se clasifican según su naturaleza u origen, sus propiedades fisicoquímicas y usos. Según su origen, pueden provenir de desechos (urbanos, industriales, mineros, agrícolas), de orígenes diversos (tabaco, conservantes, plaguicidas, estabilizantes, plastificantes, aditivos, toxinas, etc.), o de agentes industriales. Según las aplicaciones pueden ser derivados de medicamentos, uso doméstico, uso industrial, uso agrícola o de automóviles y equipos mecánicos. Pueden tener una acción intrínseca (fármacos, tóxicos de acción local, tóxicos de acción sistémica) o acciones biológicas (mutagénicos, teratógenos, carcinógenos, inhibidores o estimuladores de enzimas) y pueden tener una reactividad metabólica (biodegradables, persistentes, acumulativos, activables). Según su naturaleza pueden ser físicos (tintes, calor, radiaciones, ruido, sustancias volátiles), biológicos (seres vivos o procedentes de ellos) y químicos (orgánicos, inorgánicos, industriales). Cuando los Xenobióticos entran en contacto con el organismo, se efectúa el mecanismo de adsorción, distribución, metabolismo y excreción afectando diferentes órganos en su paso, dando lugar a procesos tóxicos, los procesos de toxicocinética y toxicodinamia. Entre los xenobióticos existentes, se pueden resaltar el material particulado, los metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, los hidrocarburos, plaguicidas, bifenilos policlorados y las dioxinas y furanos, ocasionando diferentes impactos al ambiente y a la salud de las personas, lo cual depende de la concentración, tiempo de exposición y naturaleza química de cada uno. Para comprender cómo los xenobióticos se comportan en el ambiente y dentro de los organismos vivos, constituyéndose en una herramienta necesaria en el estudio de la toxicidad de las sustancias a través de conceptualizar sobre la forma en que sucede la interacción de los xenobióticos en el ambiente y en el ser humano y se destacan algunas sustancias tóxicas comunes indicando la fuente de generación, su comportamiento y efectos negativos. El conocer cómo ocurren las interacciones de los xenobióticos, su mecanismo de transporte, cómo ingresan a los organismos, las fuentes que los originan, su naturaleza fisicoquímica y cómo se comportan, puede ayudar a prevenir, controlar, mitigar o compensar los impactos negativos que dichas sustancias ocasionan a la salud de las personas y a los ecosistemas.

El proceso de ingreso y distribución de los xenobióticos en nuestro organismo se cumple en tres fases o etapas. La fase de exposición que puede ser consecuencia de varios factores (riesgo, frecuencia, dosis), seguida de fase de etapas de toxicocinética conformadas por las etapas de absorción, distribución, metabolismo-acumulación y excreción. Para finalizar con la fase de toxicodinámica, cuando interacciona ese xenobiótico con el receptor correspondiente y se producen sus efectos tóxicos y los signos clínicos. Estos efectos dependen según si la exposición es aguda o crónica. Si es aguda, por ejemplo, el benceno nos provoca depresión del sistema nervioso central. En cambio cuando es crónica puede producir leucemia. Los xenobióticos más frecuentes en la exposición humana son los productos de limpieza, analgésicos, cosméticos, extractos vegetales, jarabes, hidrocarburos, plaguicidas, alimentos contaminados, sedantes, hipnóticos, antimicrobianos, productos químicos de diversa índole, alcoholes, vitaminas, etc. Cada uno de ellos tiene un nivel diferente de penetración en función la frecuencia de contacto. Las cuatro vías de incorporación de los xenobióticos son la ingesta oral, vía respiratoria, vía tópica y vía parenteral.

La toxicidad de los xenobióticos depende de las características de la exposición la que puede ser aguda o crónica, según las vías de entrada y de eliminación; Según la dosis (DL50, dosis única, dosis fraccionada); según la estructura molecular y propiedades físico-químicas de la sustancia (capacidad de atravesar membranas; hidrosolubilidad; liposolubilidad); según el tipo de efecto tóxico producido; según las características genéticas del organismo expuesto y la edad del individuo. Los niveles de toxicidad se expresan en función de la concentración que se reciba por kilo de peso corporal, así si la Dosis Letal Media (DL50) es superior a 15 g/kg se dice que prácticamente no es tóxico pero, en el otro extremo, si la toxicidad es inferior a 5 mg/kg se considera supertóxico.

Son considerados tóxicos ambientales los insecticidas, fungicidas, herbicidas los que se pueden acumular y producen efectos agudos (interfieren en el transporte sináptico y dan trastornos digestivos, musculares, neurológicos) o crónicos dependiendo de su acumulación (carcinógenos, neurotóxicos, reproductivos o alterar el desarrollo).

Entre los tóxicos ambientales de origen industrial se encuentran los que llamamos contaminantes orgánicos persistentes como las dioxinas. Con respecto a la influencia o efectos de la edad, en niños, como el vaciamiento gástrico es más lento, la mucosa intestinal es más permeable e inmadura (absorción menos selectiva), la función renal es inmadura, son más sensibles a plaguicidas y a los metales pesados. En los mayores hay hipoalbuminemia y por lo tanto hay mayor proporción de tóxico libre, poseen más tejido adiposo, por ende, los compuestos liposolubles se acumulan más, la función renal y hepática están disminuidas, hay menor actividad enzimática en el metabolismo de los xenobióticos) y disminuye la función del sistema nervioso central, lo que provoca mayor susceptibilidad a la acción de los xenobióticos.

MOVILIDAD, PERSISTENCIA Y BIODISPONIBILIDAD, INTERACCIONES EN LOS ECOSISTEMAS

Es de conocimiento que los ecosistemas se encuentran conformados por elementos bióticos, siendo éstos los organismos vivos y los elementos abióticos, el aire, el agua y la tierra (Sansolini, 1994); los cuales interactúan entre sí, intercambiando materia y energía, reciclando los elementos y nutrientes esenciales para la vida de las especies, todo en perfecto equilibrio (Rodríguez Martínez, 2016). Sin embargo, ese equilibro puede romperse a causa de agentes contaminantes, que pueden provenir de dos tipos de fuentes, las fuentes naturales o piogénicas y las fuentes de actividades desarrolladas por el hombre o antropogénicas. Los materiales y la energía que ingresan a los ecosistemas y que se acumulan, alteran o exceden las concentraciones iniciales de un sistema y la capacidad de acogida del mismo, se le conoce como contaminación y cuando esas sustancias son de carácter tóxico, generando perjuicios al sistema donde ingresan se le denomina como contaminación por tóxicos (Jaramillo *et al*., 2009). Por otro lado, si la clasificación se realiza según la naturaleza del agente contaminante, se tiene tres tipos de contaminación, la contaminación biológica como los virus y bacterias; la contaminación física, incluyéndose la causada por ruido, radiación, vibraciones y la contaminación química que es la causada por sustancias artificiales o xenobióticos. Para el caso de la toxicología ambiental, los xenobióticos son de especial atención por cuanto su potencial de causar daños tanto al medio ambiente como a las personas (Peña et al., 2001). Dependiendo de sus características, una vez que son descargadas las sustancias químicas al ecosistema, éstas se transforman y distribuyen por los diferentes niveles de la cadena trófica (Walker *et al*., 2012). Los productores primarios, representados por los organismos autótrofos como las plantas y algas, son el primer eslabón de la cadena. Éstos toman la energía del sol para la producción de alimento y pueden así mismo ser afectados

por sustancias por vías de ingreso como la absorción a través de sus raíces, y en este caso, si la sustancia es persistente, puede llegar a bioacumularse y aumentar su concentración con el paso del tiempo (Rodríguez Martínez, 2016; Sansolini, 1994). Luego en el siguiente eslabón, los consumidores herbívoros se alimentan de los productores, que al tener en su sistema una sustancia que se ha bioacumulado, éstos son afectados también por aquella sustancia empezando de esta manera la biomagnificación. Posteriormente, el eslabón que sigue representado por los consumidores carnívoros, toman su alimento consumiendo a los herbívoros, biomagnificando la sustancia a través de la cadena trófica (Rodríguez Martínez, 2016). Es así como al llegar al final de la cadena, las concentraciones de la sustancia son muy superiores a la inicial. Con lo anterior, se puede observar que cuando se habla de bioacumulación, se hace referencia al almacenamiento de tóxicos persistentes en los organismos a través del tiempo, acumulándose a través de alimentos contaminados o por su entorno, y que no pueden ser desechados o metabolizarlos de forma rápida, por ello se acumulan. Por otro lado, la biomagnificación es el aumento de los niveles de la concentración del tóxico a través de la cadena trófica, donde el último eslabón de la cadena, tendrá altas concentraciones del tóxico con respecto al organismo inicial. Un ejemplo de la distribución de contaminantes tóxicos en el ambiente, son los Bifenilos Policlorados (PCB's), los cuales son compuestos químicos muy persistentes, dada su estabilidad, no se degradan con facilidad, no son solubles en agua, pero sí en grasas, lo que le permite alojarse en el tejido graso de los animales y al no poder ser metabolizados adecuadamente, tienden a bioacumularse en dichos organismos (Safe, 1992). Posteriormente, estos organismos contaminados son consumidos por otros seres vivos, siendo éstos afectados también por la sustancia química alojada en el primer organismo, produciéndose de esta forma la biomagnificación (Sansolini, 1994). Así mismo, los PCB's cuando se destruyen por incineración, éstos desprenden pequeñas cantidades de dioxinas y furanos, los cuales son compuestos muy tóxicos debido a que afectan el sistema inmunológico y poseen características teratogénicas, cancerígenas y mutagénicas; es por ello que se constituyen en un importante contaminante ambiental (Marinković *et al*., 2010; Dada la persistencia de los PCB's otorgada por su estabilidad química, estos compuestos permanecen mucho tiempo en el ambiente afectando a los organismos de la forma como se ha descrito previamente (Marinković *et al*., 2010). Otro ejemplo respecto a contaminantes atmosféricos, son los gases de compuestos que contienen azufre como el dióxido de azufre (SO_2); el cual surge a partir de la quema de combustibles fósiles con contenido de azufre.

COMPARTIMIENTOS AMBIENTALES Y LOS TÓXICOS

Dentro de los ecosistemas se pueden identificar diferentes medios naturales (compartimientos) donde llegan los xenobióticos como la atmósfera, el agua y el suelo. Al compartimiento atmosférico, llegarán las sustancias en forma de gases, partículas sólidas o líquidas (vapor), emisiones causadas por fuentes móviles como los vehículos, ferrocarriles, fuentes fijas como calderas industriales, refinerías de petróleo, ladrilleras o fuentes de área como los rellenos sanitarios o almacenamiento y distribución de gases. Al compartimiento agua, pueden llegar los tóxicos a través de vertimientos, escorrentía e incluso, precipitación y dado a la capacidad del agua de disolver, pueden contener gran cantidad de elementos contaminantes en forma disuelta o suspendida (Capó, 2009). En el compartimiento suelo, pueden llegar tóxicos en diferentes situaciones como uso de pesticidas, vertimientos líquidos con contenido de solventes, metales pesados, biosidas y disposición inadecuadas de residuos sólidos entre otros, estos contaminantes tóxicos, al ser emitidos al medio, ocasionan diferentes impactos como acidificación, efecto invernadero, smog

fotoquímico, eutrofización y toxicidad en el agua y suelo (Capó, 2009). Entre las sustancias químicas y elementos nocivos más comunes que afectan a los ecosistemas por su toxicidad en cada uno de los compartimientos ambientales, se tienen los siguientes (Walker *et al*. (2012): Material particulado; metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), cromo (Cr), arsénico (As); compuestos orgánicos volátiles (COV); plaguicidas; hidrocarburos; Bifenilos policlorados (PCB) y dioxinas y furanos. Cabe acotar que todos estos compuestos van a afectar a los individuos a través de las vías de exposición. Cuando se habla de las "vías de exposición" de los organismos, éstas se dividen en oral, cutánea o dérmica y respiratoria. Las vías de exposición constituyen el mecanismo o lugar por donde los tóxicos ingresan al organismo que se encuentra expuesto a las sustancias, mientras que la "ruta de exposición" es el camino que recorren dichos tóxicos desde que son emitidos hasta llegar finalmente al individuo u organismo (Peña *et al*., 2001). Para describir la ruta de exposición se debe tener en cuenta algunos aspectos como la Fuente que causa la liberación de la sustancia tóxica al ambiente; el medio por el cual se transporta la sustancia liberada; el lugar o entorno donde entraría en contacto el individuo con el medio contaminado (punto de contacto); las Vías de exposición o manera de ingreso del tóxico al organismo. En este sentido, aparecen conceptos como Toxicocinética y Toxicodinamia. Como se ha descrito previamente, los tóxicos emitidos al ambiente, poseen características que predisponen un comportamiento de distintas maneras, produciendo efectos negativos en los ecosistemas y en los individuos expuestos; tal como el proceso que sufre un tóxico desde que ingresa al organismo hasta que éste es excretado, a lo cual se le denomina Toxicocinética y en ello, surten diferentes etapas como la Adsorción, Distribución, Metabolismo y Excreción; conformándose la sigla conocida como ADME (Peña *et al*., 2001). Por otro lado, la Toxicodinamia se encarga de evaluar cómo esos xenobióticos actúan en el organismo expuesto, es decir, las alteraciones o efectos producidos, debido a que estas alteraciones se presentan a nivel celular; lo cual, dependiendo de su magnitud, pueden producir trastornos funcionales, estructurales o incluso la muerte (Jaramillo et al., 2009). Por estas interacciones, resulta importante el identificar y evaluar los agentes tóxicos emitidos al ambiente, para conocer cómo pueden establecerse medidas que ayuden a evitar este tipo de impactos.

Las actividades antropogénicas, emiten a cada compartimiento ambiental, sustancias químicas que generan diferentes efectos en los ecosistemas y los seres vivos; lo cual depende de distintos factores que van desde el tipo de sustancia química o xenobiótico, hasta la forma en cómo se comportan, se transforman o se movilizan. Los factores como el tipo de especie, edad, tamaño y sensibilidad a la sustancia también influyen en los efectos que pueden causar los xenobióticos. Las sustancias químicas pueden ingresar a los organismos vivos por las vías de exposición y causar toxicidad a corto, mediano o largo plazo; presentándose escenarios relacionados con enfermedades respiratorias, alteraciones mutagénicas e incluso cáncer. El conocer de dónde provienen dichas sustancias y cómo actúan en el medio, permite establecer posibles soluciones para evitar las afectaciones que éstas producen. De acuerdo lo mencionado antes, entre las sustancias más comunes consideradas como tóxicas, las que afectan a los distintos compartimientos ambientales (Walker *et al*., 2012), se encuentran el material particulado, metales pesados (Pb, Cd, Hg, Cr, As), compuestos orgánicos volátiles (COV), plaguicidas, hidrocarburos, bifenilos policlorados (PCB) y las dioxinas, furanos y fertilizantes. Para comprender más la forma en que cada una de estas sustancias afectan a los ecosistemas y a las personas, se hace necesario conocer cómo las

mismas interactúan con el medio de acuerdo a sus características fisicoquímicas. La emisión al ambiente de este tipo de compuestos, ha cobrado importancia en su estudio a causa de los efectos tóxicos desde leves hasta graves, que pueden producir a la salud humana y a los ecosistemas. Entre los efectos leves a la salud, se destaca la irritación de los ojos, dolor decabeza, mareo, afectación de vías respiratorias, náuseas y fatiga, y en entre los efectos graves, se encuentra la generación de daños en la función del hígado, el sistema respiratorio, sistema neuronal, demostrándose otras afectaciones como la relación del bajo peso al nacerde los bebés y el desarrollo de cáncer.

METABOLISMO DE LOS XENOBIOTICOS

El ser humano está expuesto a una amplia variedad de sustancias químicas extrañas, tanto compuestos naturales en alimentos vegetales, como compuestos sintéticos en medicinas, aditivos de alimentos, y contaminantes ambientales. Casi todos estos compuestos quedan sujetos al metabolismo, principalmente en el hígado. En general se considera que el metabolismo de los xenobióticos es un proceso de destoxificación, a veces los metabolitos de compuestos que son por sí mismos inertes o inocuos son biológicamente activos. En síntesis, los xenobióticos son metabolizados en dos fases. La principal reacción de la fase 1 es hidroxilación catalizada por diversas monooxigenasas, conocidas como los citocromos P450. En la fase 2, las especies hidroxiladas son conjugadas con diversos compuestos hidrofílicos, como ácido glucurónico, sulfato o glutatión. La operación combinada de estas dos fases convierte compuestos lipofílicos en compuestos hidrosolubles que pueden excretarse en la orina o la bilis. El conocimiento del metabolismo de los xenobióticos es esencial para un entendimiento de la farmacología y la terapéutica, la toxicología, y el manejo de enfermedades. Todas estas áreas comprenden la administración de xenobióticos, o la exposición a los mismos. El entendimiento de los mecanismos involucrados en el metabolismo de xenobióticos permitirá el desarrollo de microorganismos y plantas transgénicos que contienen genes que codifican enzimas para el metabolismo de compuestos específicos que pueden usarse para convertir contaminantes en potencia peligrosos en compuestos inocuos. Las principales clases de xenobióticos de importancia médica son fármacos, carcinógenos químicos, compuestos naturales en alimentos vegetales y diversos compuestos que han entrado al ambiente de las personas mediante una vía u otra, como los bifenilos policlorados (PCB), insecticidas y otros plaguicidas. Hay más de 350.000 sustancias químicas ambientales fabricadas. Casi todos estos compuestos quedan sujetos a metabolismo, principalmente en el hígado. El metabolismo de xenobióticos en general se considera en dos fases. En la Fase 1, la principal reacción involucrada es la hidroxilación, catalizada principalmente por miembros de una clase de enzimas denominadas monooxigenasas o citocromos P450. La hidroxilación puede terminar la acción de un fármaco, aunque esto no siempre es así. Además de hidroxilación, estas enzimas catalizan una amplia gama de reacciones, entre ellas las que comprenden desaminación, deshalogenación, desulfuración, epoxidación, peroxigenación y reducción. En la Fase 1 también ocurren reacciones que comprenden hidrólisis (p. ej., catalizadas por esterasas) y ciertas otras reacciones no catalizadas por P450). El metabolismo de Fase 1 hace a los compuestos más reactivos, al introducir grupos que pueden conjugarse con ácido glucurónico, sulfato, acetato, glutatión o aminoácidos en el metabolismo de Fase 2. Esto produce compuestos polares que son hidrosolubles y, por ende, pueden excretarse con facilidad en la orina o la bilis. Los xenobióticos muy hidrofóbicos persistirían en el tejido adiposo casi por tiempo indefinido si no fueran convertidos en formas más polares. En algunos casos, las reacciones metabólicas Fase 1 convierten xenobióticos desde compuestos inactivos hacia compuestos biológicamente activos. En estas circunstancias, los xenobióticos originales

se denominan profármacos o procarcinógenos. A veces, reacciones de Fase 1 adicionales (p. ej., reacciones de hidroxilación adicionales) convierten estos compuestos activos en formas menos activas, o inactivas, antes de conjugación. En otros casos, son las reacciones de conjugación mismas las que convierten los productos activos de las reacciones Fase 1 en compuestos menos activos o inactivos, que se excretan. En muy pocos casos, la conjugación puede aumentar la actividad biológica de un xenobiótico (Bender and Murray)

BIODEGRADACIÓN DE COMPUESTOS XENOBIÓTICOS

La concentración de compuestos xenobióticos se ha incrementado considerablemente durante las últimas décadas debido a los productos provenientes de diferentes procesos industriales por lo que son causa de preocupación principalmente por sus efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos y por sus características bioacumulables y biomagnificantes, por ello se han probado diferentes estrategias para disminuir estos efectos. La degradación de compuestos xenobióticos es una estrategia usada ampliamente, consiste en un proceso natural llevado a cabo por diversos microorganismos que emplean dichos compuestos como una forma de supervivencia. Las rutas metabólicas de estos microorganismos transforman los contaminantes por medio de sistemas específicos disminuyendo los efectos tóxicos y contaminantes en el ambiente. Los xenobióticos son químicos persistentes en el ambiente debido a su alta estabilidad termodinámica, además, son resistentes a la biodegradación, lo que se denomina recalcitrantes, pueden tener diversos efectos tóxicos sobre la salud humana, son químicos presentes a concentraciones no naturales y son productos de procesos industriales o accidentes. En los últimos años se ha manifestado un incremento en la contaminación ambiental debido a los desechos industriales. Una gran variedad de contaminantes dañinos se produce principalmente en industrias plásticas, químicas, farmacéuticas, textiles, agrícolas, petroquímicas, papeleras, entre otras. La alta lipofilicidad de muchos de estos compuestos conlleva a una bioconcentración /biomagnificación, causando e incrementando los problemas de salud en los predadores en los niveles altos de la cadena trófica. En los compuestos xenobióticos se incluyen los contaminantes orgánicos hidrofóbicos, que se encuentran persistentes en el ambiente y tienden a biomagnificarse, este grupo hace referencia a compuestos tales como bifenilos policloratados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, clorobencenos, furanos y algunos pesticidas, principalmente aquellos usados desde tiempos atrás como el DDT y la dieldrina (Jantunen, 2010). Sinha et al (2009) mencionan que entre los principales compuestos xenobióticos se incluyen los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), antibióticos, colorantes azoicos, pesticidas, combustibles, alcanos, solventes bifenilos policlorados, dioxinas, compuestos poliaromáticos, clorados y nitroaromáticos. La recalcitrancia y persistencia de los compuestos xenobióticos en suelos varía principalmente de acuerdo al tipo de compuesto y las condiciones naturales del ambiente en el que éste se encuentre. Debido a los problemas expuestos sobre los ecosistemas y en la salud humana causados por compuestos xenobióticos, se han buscado y desarrollado nuevas estrategias para su remoción de ambientes contaminados. La biorremediación es una alternativa para la remoción de dichos compuestos en el ambiente mediante la transformación de los contaminantes a compuestos no dañinos o sustancias menos tóxicas por medio de la acción de diferentes organismos. Esta biorremediación depende de las enzimas de los microorganismos que intervienen en el proceso, y convierten los compuestos en productos inocuos. La biodegradación es un proceso natural que puede usarse para la remediación de ambientes contaminados, puesto que los microorganismos empleados usan los compuestos como una técnica de supervivencia, disminuyendo las

concentraciones de los contaminantes (Singh, 2008), siendo además uno de los métodos más empleables por su bajo costo. Diversos microorganismos cuentan con la habilidad de usar compuestos xenobióticos, lo cual conlleva a efectos benéficos como desintoxicación, descontaminación, conversión de los compuestos a otros menos tóxicos. Estos microorganismos, principalmente las bacterias, tienen la habilidad de desintoxicar ambientes contaminados por medio de transformación, inmovilización o mineralización, la cual llega a ser un proceso lento y que requiere la interacción de diversos microorganismos para que tenga lugar de manera completa, sin embargo, algunas condiciones no permiten que esto ocurra, resulta una mineralización parcial (Fewson, 1988). Hay un sinnúmero de ejemplos de remoción aerobia y anaerobia de dos compuestos xenobióticos diferentes. En la mayoría de los casos esta remoción ocurre por medio de degradación, sin embargo, cuando se pretende remover compuestos xenobióticos en condiciones anaerobias, es posible que los microorganismos realicen respiración a partir de la deshalogenación del compuesto en presencia de un compuesto empleado como fuente de carbono, posteriormente el compuesto es degradado total o parcialmente (Furukawa, 2010; Pieper, 2005). Una adaptación previa de los microorganismos es crucial para un buen desempeño y por lo tanto una degradación significativa. Los efectos sobre una adaptación llegan a ser importantes, un ejemplo es la adición de un compuesto xenobiótico a un medio, aunque la concentración de éste se mínima (100 ppb), la tasa de degradación de un consorcio adaptado llega a ser hasta mil veces más alta que la de un consorcio no adaptado (Spain and Van Veld, 1983). Debido a la amplia variedad de compuestos xenobióticos, las rutas metabólicas para la biodegradación de cada uno de ellos varían de acuerdo al tipo de compuesto del que se trata, a las condiciones bajo las cuales ocurra la degradación, y al tipo de microorganismo que participe en ella. De igual manera, la tolerancia y crecimiento de los microorganismos participantes en la degradación de los diversos compuestos varían de acuerdo al tipo y concentración del xenobiótico, así como las condiciones nutrimentales y ambientales. Uno de los tipos más comunes de biorremediación es la mineralización de los contaminantes orgánicos tóxicos a productos no tóxicos como dióxido de carbono. El oxígeno es el aceptor de electrones más común durante la respiración microbiana y la degradación de compuestos xenobióticos, además, una amplia diversidad de microorganismos capaces de degradar dichos compuestos lo hacen bajo condiciones aerobias, tal como la especie Pseudomonas, que ha sido ampliamente estudiada por su capacidad de degradar contaminantes muy diferentes (Lovley, 2003). La degradación de compuestos xenobióticos depende mayormente de las enzimas empleadas en la ruta metabólica para degradar substratos inusuales. La reacción inicial para la degradación ocurre de manera intracelular y es un proceso oxidativo que se da por la activación e incorporación de oxígeno, esta reacción es catalizada por oxigenasas y peroxidasas principalmente. Después de esto, rutas metabólicas periféricas convierten los contaminantes en intermediarios de subsecuentes metabolismos intermediarios centrales, como el ciclo del ácido tricarboxílico, seguido de una biosíntesis de biomasa celular a partir de los metabolitos precursores centrales, por ejemplo, Acetil- CoA, succinato, piruvato (Thakur, 2008). La degradación anaerobia de xenobióticos llega a ser muy importante, especialmente para llevar a cabo la mineralización de los xenobióticos con poca volatilidad, es decir, de estructuras y pesos más complejos. En algunos casos, la degradación de algunos compuestos no ocurre de manera aerobia si no existió un previo tratamiento anaerobio. La degradación anaerobia de compuestos orgánicos es llevada a cabo por microorganismos que emplean rutas metabólicas esencialmente diferentes a aquellos que realizan una degradación de manera aerobia, además, su desempeño en los ambientes contaminados depende de los aceptores de electrones que se encuentren

disponibles (Vázquez-Rodríguez et al., 2008). La biodegradación de compuestos xenobióticos se puede ver afectada por una gran cantidad de factores ambientales como pH, temperatura, salinidad, potencial redox, biomasa microbiana, biodisponibilidad, suplemento nutricional y disponibilidad de oxígeno. En condiciones de laboratorio, a través de Ensayos de Tratabilidad, estos factores deben optimizarse a manera de obtener un tratamiento microbiano efectivo, sin embargo, en condiciones naturales, ninguno de estos factores ambientales puede manipularse para alcanzar mejores tasas de degradación. Las tasas de biodegradación están influenciadas por el tipo de aceptores de electrones disponibles, del potencial redox, del pH que posee un notable efecto en la mineralización de los compuestos. Respecto a la temperatura de proceso, la mayor parte de los microorganismos aislados y estudiados llevan a cabo la degradación de compuestos xenobióticos de una manera óptima bajo condiciones mesofílicas, entre 20 ºC y 45 ºC, estas condiciones varían de acuerdo al tipo de compuesto, condiciones ambientales y principalmente, el microorganismo participante (Singleton, 1993). En las comunidades microbianas participantes en la remoción de contaminantes ocurren diversos procesos que mejoran el metabolismo microbiano, dentro de estos se encuentran la producción de factores de crecimiento, remoción de sustancias tóxicas y Cometabolismo. Los microorganismos juegan el papel más importante en la degradación de compuestos recalcitrantes debido a que tienen la capacidad de crecer empleándolos como única fuente de carbono. Las bacterias han desarrollado mecanismos para obtener energía a partir de compuestos xenobióticos, ya sea bajo condiciones aerobias o anóxicas usando aceptores finales como nitrato, sulfato e iones de hierro. Ya sea de manera aerobia o anaerobia, las enzimas de los microorganismos que participan en la degradación son altamente eficientes para romper la estructura de los contaminantes, contribuyendo con el ciclo de carbono. Se han aislado cultivos puros de bacterias capaces de degradar compuestos xenobióticos bajo condiciones aerobias o anaerobias. Entre las principales bacterias aerobias se encuentran Pseudomonas, Escherichia, Sphingobium, Pandoraea, Rhodococcus, Gordonia, Bacillus, Morazella and Micrococcus (Varsha et al., 2011), mientras que bajo condiciones anaerobias se han identificado bacterias como Clostridia, Desulfobacterium, Desulfovibrio, Methanococcus, Methanosarcina, Dehalococcoides, Flavobacterium and Klebsiella (Zhang y Bennett, 2005).

CONCLUSIONES

Los compuestos xenobióticos tienen como particularidad la persistencia en el ambiente. Su toxicidad es variable y pueden llegar a diferentes organismos por ingesta, contacto dérmico, captura o asimilación a través de la migración en distintos medios o en la cadena trófica.

De las alternativas de remediación posibles, la biorremediación se presenta como un conjunto de tecnologías viables, eficientes y útiles para la limpieza de aguas y suelos contaminados. En algunos casos también se puede utilizar para tratar gases o atmósferas industriales. Su efectividad ha sido demostrada con todo tipo de contaminantes xenobióticos que van desde las moléculas inorgánicas hasta las orgánicas más recalcitrantes.

Para llevar a cabo el proceso a nivel industrial se hace necesario realizar estudios de tratabilidad en laboratorio para identificar los consorcios de microorganismos degradadores y optimizar las condiciones de tratamiento, incluyendo etapas aeróbicas, anaeróbicas, microaerofílicas o combinación de éstas, así como la interacción con otras substancias presentes en el ambiente afectado.

REFERENCIAS

Bender, D.A.; Murray, R.K, Bioquímica Ilustrada . Harper, Capítulo 47: Metabolismo de los xenobióticos

Capó, M. A. (2009). *Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. 2da Edición. Tébar Flores (Eds). Madrid, España. 326p.

Furukawa Kensuke, "Biochemical and genetic bases of microbial degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs)", The Journal of general and applied microbiology, 46, 6, 2000, 283-296.

Jaramillo, F., Rincón, A. R. y Rico, R. (2009). Toxicología ambiental. Universidad Autónoma de Aguascalientes (Eds.). Guadalajara, México. 436p.

Kalff J. (2002) Limnology: Inland Water System. Prentice Hall. Rand G.M. y Petrocelli S.R. (1985) Fundamentals of Aquatic Toxicology. Taylor and Francis. Bristol, USA.

Lovley Derek R. (2003), "Cleaning up with genomics: applying molecular biology to bioremediation", Nature Reviews Microbiology, 1, 1, 2003, 35-44.

Marinković, N., Pašalić, D., Ferenčak, G., Gršković, B. and Rukavina, A. S. (2010). Dioxins and human toxicity. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, *61*(4),445-453.

Montero-Montoya, R., López-Vargas, R. and Arellano-Aguilar, O. (2018). Volatile organic compounds in air: sources, distribution, exposure and associated illnesses in children. *Annals of Global Health*, 84 (2), 225-238. https://doi.org/10.29024/aogh.910

Peña, C. E., Carter, D. E., Ayala-Fierro, F., Superfund, A., Research, B., & Program, T. (2001). Toxicologia ambiental. Evaluación de riesgos y restauración ambiental. Southwest hazardous waste program. University of Arizona (Eds.). Arizona, USA. 234p.USA*http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/.*

Repetto M. (1995) Toxicología avanzada. Madrid, España 621 p.

Rodriguez-Martínez, J. (2016). Ecología. 4ta Ed. Difusora Larousse – Ediciones Pirámide. 504p.

Safe, S. (1992). Toxicology, structure-function relation-ship, and human and environmental health impacts of polychlorinated biphenyls: progress and problems. *Environmental Health Perspectives*, 100, 259-268. *https://doi.org/10.1289/ehp.93100259*

Sansolini, D. (1994). Manual de ecología diaria. Espacio Editorial (Eds.). Buenos Aires, Argetina.109p

Singleton Ian, "Microbial metabolism of xenobiotics: fundamental and applied research" Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 59, 1, 1994, 9-23.

Walker G.H. (1990) "Kinetic models to predict bioaccumulation of pollutants. Functional Ecology" 4: 295 – 301.

Zhang Chunlong & Bennett George N. "Biodegradation of xenobiotics by anaerobic bacteria" Applied Microbiology and Biotechnology, 67, 5, 2005, 600-618.

USO DE MICROORGANISMOS EN MINERIA: ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA SU APLICACION

José A. Gálvez, Sergio A. Vardaro, José A. Cantero, Cecilia López, Lucas Caride, Fernando Lucero.

Bioprocesos, Facultad de Ingenieria. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza Argentina.

e-mail: jose.galvez@ingenieria.uncuyo.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se analizan las distintas alternativas que ofrecen los microorganismos para su uso en minería. Los microorganismos poseen varias vías metabólicas que se usan ampliamente en minería. Las aplicaciones incluyen recuperación de metales desde minerales de baja ley, recuperación de materiales residuales desde los residuos sólidos urbanos y electrónicos, y tratamiento de efluentes de origen minero. En la recuperación de metales los microorganismos autóctonos en forma preferencial o alóctonos (en el menor de los casos) trabajan sobre los minerales de interés económico produciendo la liberación de los mismos al producir procesos de separación que incluyen entre otros la lixiviación ácida por la transformación de sulfuros en sulfatos, ya sea en pilas de material residual (ganga) acumuladas en los yacimientos, en minerales de baja concentración o in situ si las condiciones de la formación geológica, en particular la porosidad, lo permiten. Una ventaja del proceso es que los minerales no requieren una molienda fina. Los sistemas de tratamiento ex situ varían desde pilas de lixiviación, hasta reactores tanque agitado. En caso de la recuperación in situ se recurre al uso de pozos inyectores y extractores de la solución acuosa. El lixiviado recuperado se trata y se separan los metales de interés como Cobre, Hierro, Oro, Plata y Uranio entre otros. En la recuperación de metales desde los residuos urbanos y electrónicos se procede en forma similar a los minerales. El tratamiento de residuos se hace en las corrientes acuosas que se generan en la mina, entre otros incluyen modificación de la especiación del metal o absorción del compuesto en forma similar a un biofiltro. Se analizan las condiciones de procesos, ventajas, desventajas y precauciones para aplicar esta técnica incluida el consumo de agua y la generación de corrientes residuales.

Palabras Clave: Biomineria, Microorganismos, Minerales, Procesos, Efluentes.

INTRODUCCIÓN

La biominería es el término genérico utilizado para describir tecnologías que utilizan sistemas biológicos (principalmente microorganismos procarióticos) para facilitar la extracción y recuperación de metales de minerales de baja ley y de materiales de desecho, aprovechando la gran variedad de vías metabólicas que permiten actuar sobre substancias orgánicas e inorgánicas. Su objetivo es optimizar la recuperación de metales básicos (Cobre, Niquel, Zinc) y metales preciosos (Oro, Plata), pero también otros minerales valiosos asociados tanto por motivos económicos como medioambientales (Barrie and Johnson, Natarajan).

Es adecuada para tratar minerales donde la presencia de ciertos elementos (por ejemplo Arsénico) interfiere en la fundición provocando daños. Es alternativa para el tratamiento de residuos industriales y urbanos como polvo, escorias, tierras raras, elementos radiactivos y “productos al final de su vida útil” que contienen metales valiosos.

También es adecuada para la detoxificación de corrientes de efluentes, lodos, y colas mineras (Mahmoud et al, Natarajan, Park et al, Qu et al).

Los principales inconvenientes de la biominería son el tiempo prolongado requerido para obtener niveles económicos de extracción de metales. Todavía depende de la voladura y molienda de cuerpos minerales, si bien se han ensayado biolixiviaciones in situ con cierto éxito en rocas permeables, no se puede aplicar a todos los yacimientos. Además, los procesos de optimización de la tecnología se ven dificultados por el conocimiento limitado que aún se tiene de las vías metabólicas y la cinética, tanto microbiana como química y las interacciones con la roca (Barrie and Johnson).

INTERACCIÓN MICROORGANISMOS Y MINERALES

Muchos microorganismos que habitan en minas y minerales contribuyen a la formación y conversión natural de formas minerales (biogénesis y biomineralización). Estos organismos son capaces de disolver minerales para liberar iones metálicos a partir de los cuales se pueden obtener metales puros (biohidrometalurgia). También son capaces de provocar la disolución selectiva de minerales o la separación de constituyentes minerales indeseables de una matriz de minerales multimetálicos (biobeneficio de mineral). Cuando se cultivan en presencia de minerales o se exponen a ellos, estos organismos desarrollan tolerancia a metales tóxicos y minerales tóxicos y secretan biorreactivos específicos que se utilizan en biobeneficio (Natarajan).

Existen ciclos microbio-metal-mineral para metales y elementos como el carbono, azufre, nitrógeno, fósforo, hierro y muchos otros. Los microorganismos facilitan la recuperación de metales a partir de desechos que contienen metales y/o metales raros, como escorias, relaves, sobrecarga de minas, desechos electrónicos, minerales de baja ley y drenaje ácido de minas (Natarajan).

Los métodos biotecnológicos se basan en procesos que bacterias y hongos son capaces de llevar a cabo sobre los metales, minerales y residuos, se pueden resumir (Natarajan):

1- Captación y salida de iones metálicos
2- Sorción a membranas
3- Biosorción a superficies inertes
4- Asimilación intracelular de metales e iones
5- Movilización e inmovilización
6- Reducción y oxidación: precipitación de metales y compuestos
7- Solubilización y especiación de metales
8- Producción de quelantes

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MICROORGANISMOS DEGRADADORES DE MINERALES

Se han informado diferentes cepas microbianas en ambientes mineros y se han aislado de lixiviados, muestras de agua de mina, muestras de minerales y drenaje ácido de mina. Las condiciones ambientales en su mayor parte tienen valores de pH tan bajos como 3,6 y altas concentraciones de metales de hasta 200 g/L, pero en estos sistemas se encuentran altos niveles de diversidad microbiana, incluidas bacterias, hongos y algas. Debido a estas condiciones ambientales es bajo el riesgo de contaminación con otros microorganismos no deseados que interfieran o desvíen el proceso (Netarajan).

Bacterias:

Los tipos de microorganismos que se encuentran en los procesos de lixiviación en pilas son similares a los que se encuentran en los procesos de tanque agitado, sin embargo, las proporciones de la población pueden variar según el mineral y las condiciones de proceso. Se considera que los microorganismos más importantes son un consorcio de bacterias Gram-negativas. Estos son los oxidantes de hierro y azufre. Los microorganismos predominantes en la biominería incluyen bacterias oxidantes de azufre (p. Acidithiobacillus thiooxidans y Acidithiobacillus caldus), bacterias oxidantes de hierro y azufre (Acidithiobacillus ferrooxidans o Sulbacillus spp.) y bacterias oxidantes de hierro (Leptospirillum ferrooxidans y Leptospirillum ferriphilum). Estas son las bacterias y arqueas quimiolitotróficas oxidantes de hierro y azufre. Se requiere que los microorganismos crezcan en un medio esencialmente inorgánico, aeróbico y ambiente extremada o moderadamente ácido (Netarajan, Rawlings 2005). Cuatro de las características más importantes son (Rawlings 2005):

1- crecen autotróficamente fijando CO_2 de la atmósfera;
2- obtienen su energía usando hierro ferroso o compuestos de azufre inorgánico reducido (algunos usan ambos) como donante de electrones, y generalmente usan oxígeno como aceptor de electrones;
3- son acidófilos y crecen en ambientes de pH bajo (pH. 1.4 a 1.6 es típico)
4- son notablemente tolerantes a una amplia gama de iones metálicos.

También actúan sobre compuestos que acompañan al mineral como As (caso de las arsenopiritas) que pasa a formas más solubles y luego deben ser neutralizadas en el proceso. Los procesos operan desde temperaturas ambiente hasta alrededor de 80°C, habiendo procesos mesófilos (temperatura ambiente a 40 °C), mesotermófilos (45 a 55 °C) y termófilos (60 a 80 °C). Pueden formar biofilms que son comunidades de microorganismos incrustados en una matriz de producción propia de exopolisacáridos (EPS), que consisten principalmente en polisacáridos, proteínas, lípidos y ADN. La formación de biopelículas sobre sulfuros metálicos se considera importante para la biolixiviación ya que los microorganismos adheridos son los que inician el proceso de lixiviación al proporcionar un espacio de reacción ampliado entre la superficie de sulfuro metálico y las celdas en las que se acumulan los iones de hierro (III) (Bellenger et al, Natarajan).

Hongos:

Los hongos y mohos forman la mayor parte de la biomasa en algunos yacimientos minerales dependiendo de la profundidad de la mina y las condiciones de nutrientes son muy buenos por capacidad para formar complejos metálicos solubles en agua y generar ácidos orgánicos y enzimas. Tienen el potencial de solubilizar metales y metaloides a partir de compuestos insolubles como minerales, fosfatos, sulfuros y óxidos metálicos. Los hongos que se desarrollan en un medio neutro o alcalino son útiles cuando se trata de lixiviar metales como uranio de calizas, carbonatos, calcretas y fosfatos. Estos últimos no son adecuados para la lixiviación tradicional debido a la necesidad de acidificarlos y su alto costo. Para el resto de los minerales se pueden utilizar hongos acidófilos que prosperan a pH 3. Los hongos más interesantes son Aspergillius, Penicillium y Clamidiosporum. Para desarrollarse todos los microorganismos requieren fuentes de nitrógeno, fósforo y oligoelementos para desarrollarse. Si bien estos pueden encontrarse en los minerales, también puede ser necesario incorporarlos a los sistemas de tratamiento. En el caso de hongos y mohos se requiere además una fuente de carbono. En general son procesos exotérmicos aunque pueden encontrarse procesos anaeróbicos endotérmicos (Jeremic et al, Mishra et al; Natarajan, Qu et al).

MECANISMOS FUNDAMENTALES DE LIXIVIACIÓN ASISTIDA POR BACTERIAS DE LA OXIDACIÓN DE MINERALES SULFURADOS

Originalmente, existe un modelo con dos mecanismos diferentes involucrados simultáneamente en la lixiviación asistida por bacterias de minerales de sulfuro.

Esta el mecanismo “directo” en el que la membrana bacteriana interactúa directamente con la superficie del sulfuro mediante mecanismos enzimáticos, existiendo transferencia directa de electrones del sulfuro metálico a la celda unida a la superficie del mineral.

También existen mecanismos "indirectos" está mediada por iones férricos (Fe^{3+}) generado a partir de la oxidación microbiana del ion ferroso (Fe^{2+}) compuestos presentes en el mineral. El ion férrico (Fe^{3+}) actúa como agente oxidante y puede oxidar sulfuros metálicos y se reduce químicamente a un ion ferroso. Posteriormente, los iones ferrosos pueden volver a oxidarse microbianamente a iones férricos. En este caso, el hierro tiene un papel como transportador de electrones (Mahmoud et al).

Convertir sulfuros (u óxidos) metálicos insolubles en sulfatos metálicos solubles en agua o como un proceso de pretratamiento para abrir la estructura del mineral permite que otros productos químicos penetren mejor en el mineral y solubilicen el material deseado. La lixiviación de metales ahora se reconoce como un proceso principalmente químico en el que el hierro férrico y los protones son responsables de llevar a cabo las reacciones de lixiviación. El papel de los microorganismos es generar los productos químicos de lixiviación y crear el espacio en el que tienen lugar las reacciones de lixiviación. Los microorganismos suelen formar una capa de exopolisacárido (EPS) cuando se adhieren a la superficie de un mineral. Es dentro de esta capa de EPS donde las reacciones de biooxidación tienen lugar de manera más rápida y eficiente y, por lo tanto, el mismo sirve como espacio de reacción (Rawlings 2005).

El potencial redox de la solución a granel, y específicamente la proporción de hierro ferroso a hierro férrico, también influye, al menos indirectamente, de manera selectiva en la actividad de diferentes especies microbianas aunque hay eventos electroquímicos interfaciales en los que el ambiente local podría ser más agresivo. La discusión de los mecanismos de disolución de minerales a nivel molecular es probablemente más avanzada en el campo de la electroquímica de minerales que en el área de las interacciones microorganismo-metal, particularmente para organismos distintos de A. ferrooxidanos y L. ferrooxidans. Si bien existe una gran diversidad de microorganismos acidófilos, son pocas especies las que predominan en las condiciones generalmente utilizadas en los procesos industriales. Cuando es posible mantener la acidez y el hierro férrico en solución con cualquiera de una variedad de especies, la composición real de la población puede no ser importante, pero a medida que cualquier parámetro (como la temperatura, el hierro férrico o la concentración de sal) se vuelve más selectivo, se requiere más atención en la selección y desarrollo de una cultura para la aplicación (Chaeruna et al).

VARIABLES OPERATIVAS E INTERFERENCIAS

Las variables operativas van a depender del tipo de mineral y del sistema de tratamiento (pila de suelo, relaves, recuperación in situ, biorreactor tanque agitado): Aporte de oxígeno u otro aceptor de electrones, control de temperatura, aporte de nutrientes, grado de trituración o molienda, tipo de microorganismos que van a afectar el mineral y el pH sistema de tratamiento. Puede ser necesario incluir el aporte de azufre además de nitrógeno y fósforo (Natarajan, Rawlings and Johnson).

Las proporciones relativas de cada mineral dictan varios requisitos del proceso, como enfriamiento, consumo/producción de ácido, demanda de oxígeno, grado de precipitación y neutralización. Las interferencias pueden derivar de los compuestos que acompañan al mineral que aumentan la toxicidad al liberarse como el flúor. También se producen interferencia cuando se lixivian metales combinados como Zn y Pb en presencia de As y Cl que limita la recuperación de Pb por formación Cloruro de Arseniato de Plomo, sumamente insoluble. Se ha encontrado que el potencial redox influye en la biolixiviacion y en algunos casos se ha logrado mejorar la capacidad de extracción mediante la aplicación de pequeños potenciales eléctricos (voltajes), pero en otros casos la aplicación es contraproducente, por lo que el desarrollo de la tecnología va a requerir ensayos de laboratorio que después deben ser escalados y los mismos deberán repetirse cuando cambie la composición del mineral a medida que avanza el proceso, implicando si es necesario el cambio de población microbiana o en el uso de biorreactores distintas etapas de procesamiento del mineral (Natarajan, Nguyena et al).

BIOPROCESAMIENTO DE MINERALES - CARACTERÍSTICAS

El bioprocesamiento de minerales puede ser el próximo gran desarrollo en el sector minero debido a la necesidad de utilizar cuerpos minerales enterrados profundamente y al mismo tiempo minimizar los costos de energía y la huella de carbono. Esta situación podría utilizar la extracción de metales de formaciones minerales fracturadas utilizando fluidos de lixiviación generados microbiológicamente, ya sea ex situ (biorreactores) o in situ (Mahmoud et al).

Los procesos de biominería más importantes son (Natarajan, Sethurajan et al):

1- Biolixiviacion directa por actividad metabólica de las bacterias e indirecta por acción de metabolitos secundarios que implica la oxidación bacteriana y la disolución de minerales para la extracción de metales,
2- Biorreduccion: convierte un metal soluble en especies insolubles que son separadas de una corriente líquida. Se aplica a metales preciosos y a metales tóxicos como Cr, Co, y Se, que pasan a formas menos solubles (con menor estado de oxidación)
3- Biosorcion: los microorganismos se usan como adsorbentes y retienen en sus paredes celulares ya sea por sus propiedades o como un mecanismo de defensa. Uno de los usos es la extracción de metales de las corrientes de efluentes.
4- Biobeneficio: Bioflotacion. Beneficiar a los minerales extraídos con miras a eliminar las impurezas minerales indeseables, enriqueciéndolos así con la fase mineral deseada antes de la extracción del metal. La flotación y floculación de minerales inducida por microbios se puede lograr a través de interacciones microbiominerales que hacen que las superficies minerales sean hidrofóbicas o hidrofílicas a través de alteraciones químicas superficiales. Muchos biorreactivos específicos de minerales que contienen exopolisacáridos y compuestos proteicos sirven como colectores de flotación y depresores, así como también como floculantes o dispersantes.

MECANISMO DE BIOLIXIVIACIÓN

El proceso de biolixiviación utiliza el efecto catalítico producido por las actividades metabólicas de los microorganismos oxidantes de hierro y azufre, lo que resulta en una aceleración de la degradación química de los sulfuros. La biolixiviación es una técnica económica, eficiente, simple y respetuosa con el medio ambiente para descontaminar lodos en comparación con el proceso de tratamiento ácido. Microbios como A. ferroxidans involucrados en la biolixiviación no requieren ninguna fuente adicional de

donantes de carbono y electrones. No se requiere una esterilización en el proceso, ya que el bajo pH logrado en el proceso en sí se ocupa de otros biocontaminantes. Estas características mejoran la viabilidad económica del proceso para aplicaciones a gran escala en condiciones de campo reales. Una vez que el metal se lixivia a la solución, la recuperación del metal de la solución rica en metales mediante el uso de cal, etc. hace que el proceso de biolixiviación en general sea rentable (Natarajan, Pathak et al).

La reacción de disolución del mineral no es idéntica para todos los sulfuros metálicos y la oxidación de diferentes sulfuros metálicos se produce a través de diferentes intermediarios. Un mecanismo de tiosulfato ha sido propuesto para la oxidación de sulfuros metálicos insolubles en ácido. En este mecanismo, la solubilización se produce mediante el ataque del hierro férrico a los sulfuros metálicos insolubles en ácido, siendo el tiosulfato el principal producto intermedio y el sulfato el principal producto final. Otro mecanismo, como el de polisulfuro para soluciones ácidas. En este caso, la solubilización del sulfuro de metal soluble en ácido es a través de un ataque combinado de hierro férrico y protones, con azufre elemental como principal intermediario. Este azufre elemental es relativamente estable, pero puede ser oxidado a sulfato por microbios oxidantes de azufre (Natarajan).

APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA BIOLIXIVIACION

Biolixiviación de metales y minerales de uso industrial

Los principales usos de la biomineria son la lixiviación de minerales de Cu, U, Fe, Zn, Co, Ni, Au, Ag. Además se pueden utilizar los microorganismos para disminuir el contenido de S en petróleo y carbón, extraer metales del fuel oil y combustibles derivados del petróleo (Barry and Johnson, Bellenberg et al, Mahmoud et al, Natarajan, Rawlings and Johnson, Yana et al).

La biolixiviación comercial puede llevarse a cabo ex situ utilizando lo que puede considerarse un proceso de baja tecnología: el riego de vertederos o la formación de pilas de lixiviación (figuras 1 y 2) en donde se produce la lixiviación mediante la adición de agua, microorganismos si es necesario y nutrientes, con la posterior recolección de lixiviado, recuperación del metal de interés y reciclado de los fluidos remanentes. En este proceso se establece una población microbiana en el mineral

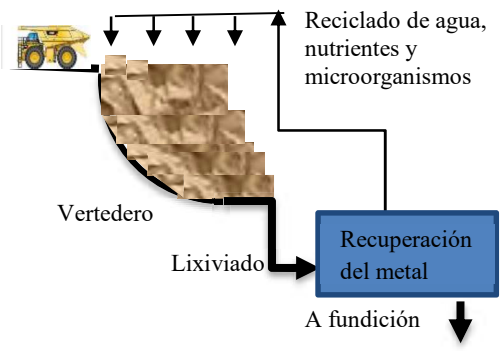


Figura 1. Lixiviación en vertederos

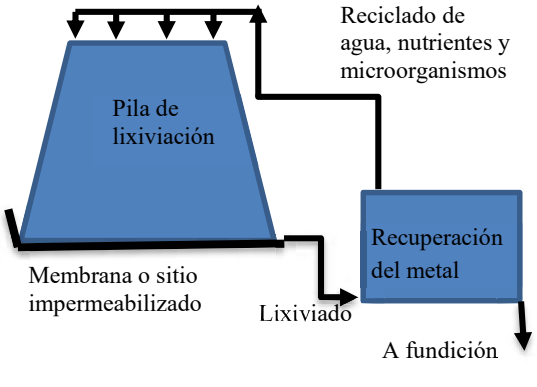


Figura 2. Pila de lixiviación

Este proceso se puede realizar en reactores biológicos en donde se pueden controlar mejor las variables operativas o realizar varias etapas en serie con diferentes microorganismos para atacar distintos componentes del mineral (figura 3) en lugar de usar las pilas de lixiviación (Natarajan).

Aparte del tratamiento ex situ si se dispone de una formación porosa que contenga el mineral de interés rodeada por formaciones impermeables se puede realizar la lixiviación in situ de acuerdo al esquema de la figura 4 (Natarajan) inyectando la solución de microorganismos desde un reactor a través de pozos inyectores, el fluido atraviesa la formación generando una población importante de microorganismo y el lixiviado es recuperado mediante pozos extractores.

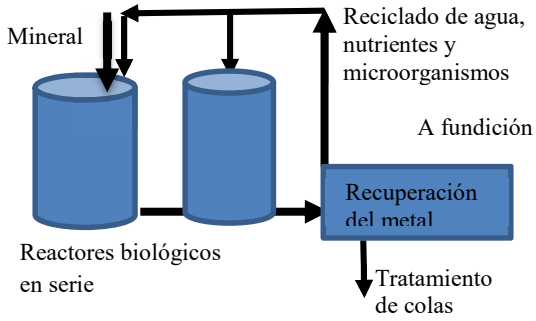


Figura 3. Lixiviación en reactores

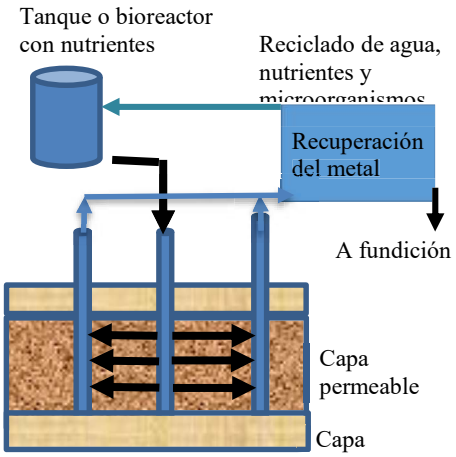


Figura 4. Biolixiviacion in situ

Biolixiviación metales pesados de relaves mineros

La técnica de biolixiviación se ha aplicado cada vez más a la extracción y recuperación de minerales metálicos y sedimentos, suelos y lodos contaminados con metales pesados. Es un proceso ambientalmente más limpio en comparación con los procesos físicos y químicos, rara vez emite contaminantes atmosféricos y es más económico y fácil de operar. Se encuentra que las bacterias comúnmente empleadas en los procesos de biolixiviación son del género Acidithiobacillus y thiobacillus, como Acidithiobacillus ferrooxidans, A. thiooxidans y Thiobacillus tioparus. La disolución directa de los minerales es causada por el ataque a los minerales sulfurados por el sistema enzimático de las bacterias situadas en la superficie del mineral. Para lograr una solubilización satisfactoria y eficiencias de recuperación de metales de los relaves mineros, es importante elegir las cepas bacterianas adecuadas que dependerán del tipo de metales pesados que necesitan recuperarse y proporcionar las condiciones óptimas para el crecimiento bacteriano (Nguyen et al, Zhao et al).

Lixiviación química y bacteriana de metales de una escoria de fundición

Las propiedades de los residuos de escoria de fundición son muy variables en cuanto a mineralogía y contenido de metales y son específicas del proceso metalúrgico. Existen preocupaciones ambientales sobre el almacenamiento a largo plazo en rellenos sanitarios, vertederos y lagunas debido a la solubilización potencial de elementos bajo condiciones ambientales. Los metales en las escorias también representan una pérdida de ingresos ya que no se recuperan durante el proceso de fundición. Algunos autores informaron una disolución de Cu de una escoria de fundición de cobre usando sulfato férrico-ácido sulfúrico como lixiviante. En ambos estudios, el proceso podría potencialmente emplear microorganismos moderadamente termofílicos para producir y regenerar soluciones de sulfato férrico. Los materiales de desecho de escorias metalúrgicas son insuficientes como sustratos para las bacterias y su biolixiviación requiere la adición de S externo o fe2+. La lixiviación química se consideró

insignificante en comparación con los resultados del enfoque de biolixiviación (Kaksonen et al).

Biolixiviación de residuos producidos en hornos de petróleo

El fuel oil es una de las fracciones pesadas en los procesos de destilación del petróleo, es un líquido espeso y viscoso y se utiliza para la generación de energía debido a su alto valor energético. Cuando se quema produce dos clases de ceniza. Las cenizas de fondo son las cenizas pesadas que quedan en el fondo del horno y las cenizas volantes son las cenizas ligeras que se acumulan en las pilas del horno. Los hornos alimentados con petróleo producen cenizas residuales clasificadas como de alto grado con una concentración de vanadio mayor al 10% con cantidades variables de níquel. Se ha estudiado la biolixiviación de metales a partir de una muestra de cenizas quemadas con petróleo ricas en Vanadio (OFA: oil - fired ash) utilizando Acidithiobacillus ferrooxidans. El resultado mostró que la biolixiviación fue más efectiva que la lixiviación química. Los resultados indicaron que el proceso de biolixiviación detoxificó el OFA y el biolixiviado podría reutilizarse en otros procesos o eliminarse de manera segura (Lee et al).

Biolixiviación de metales pesados a partir de lodos de depuradora

El tratamiento de las aguas residuales municipales da como resultado la producción de grandes cantidades de lodos de depuradora, cuya eliminación es de gran preocupación ambiental. La aplicación al suelo es el método más utilizado en todo el mundo y se considera uno de los métodos más económicos para la eliminación de lodos ya que es una fuente de nutrientes y fácilmente disponible y, por lo tanto, puede ahorrar costos sustanciales, si se aplica al suelo como fertilizante. Se caracterizan por presentar N, P, otros micronutrientes (cobre, zinc, molibdeno, boro, hierro, magnesio y calcio) y materia orgánica que son beneficiosos para la silvicultura, la producción de vegetación y el paisajismo. La aplicación de lodos en tierras agrícolas mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Sin embargo, la aplicación repetida de lodos contaminados puede liberar metales pesados en el suelo debido a la descomposición de la materia orgánica. Esto da como resultado la incorporación de metales pesados en la cadena alimenticia pudiendo alcanzar al ser humano y la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales por los metales lixiviados. Además, el exceso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo así como bacterias y contaminantes orgánicos presentes en el lodo puede filtrarse a las aguas subterráneas, si no es consumido por la vegetación. En los últimos años se han realizado varios intentos para la descontaminación de los lodos antes de su vertido en tierra. La aplicación práctica de los procesos químicos aún es limitada debido al requerimiento de una gran cantidad de productos químicos, el alto costo, las dificultades operativas y los problemas de contaminación secundaria asociados con ellos. Por lo tanto, el interés de la investigación se desplazó hacia el proceso de biolixiviación que, es un método eficiente y económico para la eliminación de metales pesados del lodo. El proceso también se ha aplicado con éxito para la remediación de suelos, sedimentos, desechos industriales y desechos sólidos contaminados con metales (Pathak et al).

Eliminación biológica de azufre y cenizas de carbones de azufre con alto contenido de pirita de grano fino utilizando un cultivo mixto de microorganismos mesófilos.

La biolixiviación de pirita de carbón es una opción prometedora para reducir el contenido de azufre de los carbones con alto contenido de azufre desde un punto de

vista económico, técnico y ambiental. Se han realizado con un cultivo mixto de microorganismos mesófilos acidófilos oxidantes de hierro y azufre, incluidos Acidithiobacillus ferrooxidans, Acidithiobacillus thiooxidans y Leptospirillum ferrooxidans para eliminar el azufre pirítico del carbón con alto contenido de azufre de Mehr Azin, Tabas, Irán. Los ensayos se llevaron a cabo con una densidad de pulpa del 5 % (p/p), un tamaño de partícula inferior a 500 μm, y una velocidad de agitación de 150 rpm a 35 °C durante 30 días. La máxima remoción de azufre (50,3% de azufre total) se obtuvo al pH inicial de 1, la adición de sulfato ferroso de 0,02 M y medio nutritivo Norris. Los valores de contenido total de azufre y cenizas se redujeron de 3,87% a 1,92% y de 25,72% a 11,6%, respectivamente (Kiania et al).

Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)

Los componentes eléctricos y electrónicos se encuentran conformados a partir de polímeros, metales y materiales cerámicos. Con el desarrollo tecnológico y la mayor utilización, la vida útil de los mismos se ha visto disminuida lo que trae como consecuencia una producción mayor de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Se considera residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) a todo objeto o sustancia que cumplida su vida útil o que se encuentra fuera de servicio es desechada o almacenada. Dentro de los RAEE se tienen en cuenta componentes, subconjuntos y consumibles que son constituyentes del aparato en el momento en que se descarta. La definición de RAEE incluye a residuos provenientes de hogares como los de uso profesional. Para el tratamiento de estos residuos se utilizan principalmente biolixiviación, biorreducción y biocianuración. En menor medida se utilizan biosorción y bioflotación (Sethurajan et al).

Los microorganismos involucrados más empleados son (Sethurajan et al 2018): Bacterias quimiolitoautotrofas (acidithiobacillus thiooxidans y ferrooxidans); Bacterias heterótrofas (Cromobacterium violaceum y algunas especies de pseudomonas) y Hongos (Aspergillus Níger). Estos interactúan con los metales presentes en residuos generando subproductos tales como ácidos inorgánicos (ácido sulfúrico, cianuro), ácidos orgánicos (cítrico, oxálico, acético, etc.), exopolisacaridos, sideroforos (reductores de hierro) y otros metabolitos que permiten la disolución de minerales como es en el caso de los ácidos y también dan lugar a la formación de complejos y quelatos de iones metálicos juntos con los metabolitos formados (Sethurajan et al 2018; Mirazimi et al 2015; Isildara et al). Este proceso se encuentra en fase de laboratorio aún. En los mismos se realiza la trituración del residuo y luego se trata en solución entre 2 y 8 % formando una pulpa, cuando se utilizan bacterias el pH es ácido y cuando se usan hongos es alcalino. Las temperaturas varían entre 20 y 60 °C dependiendo del microorganismo considerado. Los factores principales que afectan a estos procesos son: concentración de la biomasa aplicada, pH, Tolerancia de los microorganismos a los metales que se busca separar, Tipo y cantidad de productos metabólicos liberados, Densidad de pulpa, tamaño de grano y composición mineral. Los resultados de diferentes ensayos se muestran en la Tabla I (Sethurajan et al 2018; Mirazimi et al 2015; Isildara et al).

Tabla I. Resultados de biotratamiento de RAEE

Material	organismo	Metal lixiviado	Remoción lograda	Mecanismos
placas de circuitos	*acidithiobacillus thiooxidans y Ferrooxidans*	Cu, Al, Zn, Pb, Sn, Cd, Au	> al 90 % de Cu, Al, Zn, Pb, Sn, Cd 15% de Au	Producción de ácido sulfúrico y biorreduccion
	Cromobacterium Violaceum			cianuro biogénico
	Pseudomonas Putida			Acidos orgánicos (acético, oxálico, cítrico)
	Aspergillus Niger			
Residuos LED	*acidithiobacillus Ferrooxidans*	Cu, Ni y Ga	84% Cu 96% Ni 60% Ga	Biorreduccion
convertidor LD	*acidithiobacillus thiooxidans*	V	92% de V	Ácido sulfúrico
	Pseudomonas Putida			acidos orgánicos
	Aspergillus Niger			
lámparas fluorescentes	*consorcio de zygosaccharomyces lentusy*	Yb, Eu (tierras raras)	7,4 - 12,5 % de Yb y Eu.	acidos Orgánicos

CONCLUSIONES

1. El uso de microorganismos es una técnica útil para procesar minerales de baja ley y residuos industriales
2. Requiere un manejo cuidadoso de los fluidos que se generan para recuperar el metal
3. Es útil para tratar corrientes residuales en donde la concentración de metales es baja y hace muy costosos los métodos químicos
4. Para llevarla a cabo se requieren ensayos de laboratorio y planta piloto para determinar las variables operativas del proceso antes de llevarla a escala industrial
5. Es prometedor su uso para tratar corrientes de residuos electrónicos. Este proceso se encuentra en su mayor parte en fase de laboratorio aún.
6. Como desventaja requiere aún la voladura y trituración del mineral en la mayoría de los procesos industriales.

REFERENCIAS

Barrie D, Johnson D: *Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials*. Current Opinion in Biotechnology 30 (2014), 24-31.

Bellenberg S, Diaz M, Noël N, Sand W, Poetsch A, Guiliani N, Vera M: *Biofilm formation, communication and interactions of leaching bacteria during colonization of pyrite and sulfur surfaces.* Research in Microbiology 165 (2014), 773-781

Chaerun, Siti Khodijah; Robi Suryaning Sulistio, Wahyudin Prawira Minwala, Mohammad Zaki Mubaroka. Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by Aspergillus niger. Hydrometallurgy 174 (2017) 29-37.

Ghassa S, Boruomand Z, Moradian M, Abdollahi H, Akcil A: Microbial Dissolution of Zn-Pb Sulfide Minerals using mesophilic iron and sulfur-oxidizing acidophiles. Mineral Processing & Extractive Metal 36 (2015), 112-122.

Işıldar A: ,. Renea E. , van Hullebuscha E , Lensa P. "*Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies"* , Resourses, Conservation & Recycling 135 (2018) 296-312.

Jeremic,Sanja; Vladimir P. Be-skoski, Lidija Djokic, Branka Vasiljevic, Miroslav MVrivic, Jelena Avdalovic, Gordana Gojgi Cvijovic, Latinka Slavkovic Beskoski, Jasmina Nikodinovic-Runic. Interactions of the metal tolerant heterotrophic microorganims and iron oxidizing autotrophic bacteria from sulphidic mine environmente during bioleaching experiments Journal of Environmental Management 172 (2016) 151-161

Kaksonen, Anna H.; Silja Särkijärvi, Jaakko A. Puhakka, Esa Peuraniemi, Saku Junnikkala, Olli H. Tuovinen. *Chemical and bacterial leaching of metals from smelter slag in acid solutions.Hydrometallurgy 199 (2016) 46-53.*

Lee, Eunseong, Yosep Han, Jeonghyun Park, Jeongsik Hong, Rene A. Silva, Seungkon Kim, Hyunjung Kim. *Bioleaching of arsenic from hightly contaminated mine tailings using Acidithiobacillus thiooxidans. Journal of Environmental Management 147 (2015) 124-131.*

Kiani, MH; A. Ahmadi, H. Zilouei Biological removal of sulphur and ash from fine-grained high pyritic sulphur coals using a mixed culture of mesophilic microorganisms Fuel 131 (2014) 89-95.

Mahmoud A, Cézac P, Hoadley A, Contamine F, D'Hugues P: A review of sulfide minerals microbially assisted leaching in stirred tank reactors. International Biodeterioration & Biodegradation 2017, 119:118-146.

Mirazimi S.M.J, Abbasalipour Z., Rashchi F. *"Vanadium removal from LD converter slag using bacteria and fungi".* Journal of Environmental Management 153 (*2015) 144-151.*

Mishra, A; N. Pradhan, RN Kar, LB Sukla, BK Mishra Microbial recovery of uranium using native fungal strains Hydrometallurgy 95 (2009) 175-177.

Natarajan, K.A. Biotechnology of Metals. Elsevier, Amsterdam 2018.

Nguyen; Van Khanh, Mu Hyun Lee, Hyung Jun Park, Jong-Un Lee. *Bioleaching of arsenic and heavy metals from mine tailings by pure and mixed cultures of Acidithiobacillus spp. Journal of industrial and Enginneering Chemistry 21 (2015) 451-458.*

Park J, Han Y, Lee E, Choi U, Yoo K, Song Y, Kim H: Bioleaching of highly concentrated arsenic mine tailing by Acidithiobacillus ferrooxidans. Separation and Purification Technology 133 (2014), 291-296.

Pathak, A; Dastidar, MG; Sreekrishnan, V. *Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review. Journal of Environmental Management 90 (2009) 2343-2353.*

Qu, Yang; Bin Lian: Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using Penicillium tricolor. Bioresource Technology 136 (2013), 16-23.

Rastegar, SO; Mousavi, SM; Shojaosadati, SA; Sarraf Mamoory. R. *Bioleaching of V, Ni, and Cu from residual produced in oil fired furnaced using Acidithiobacillus ferrooxidans. Hydrometallurgy 157 (2015) 50-59.*

Rawlings D: Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. Microbial Cell Factories. 2005, 4:13.

Rawlings D, Johnson, D. Biomining. Spinger –Verlag Berlin Heidelberg 2007.

Sethurajan M., van Hullebusch E., Nancharaiah Y. *"Biotechnology in the management and resource recovery from metal bearing solid wastes: Recent advances",*.Journal of Environmental Management 211 (2018) 138-153.

Xia, Mingchen; Peng Bao , Ajuan Liu , Mingwei Wanga , Li Shena , Runlan Yua , Yuandong Liua , Miao Chenc, , Jiaokun Lia , Xueling Wua , Guanzhou Qiua , Weimin Zenga, *"Bioleaching of low-grade waste printed circuit boards by mixed fungal culture and its community structure analysis"*, Resources, Conservation & Recycling 136 (2018) 267-275.

Yan,Lei; Huixin Hu, Shuang Zhang, Peng Chen, Weidong Wang, Hongyu Li. Arsenic tolerance and bioleaching from a realgar base on response Surface methodology by Acidithiobaciluus ferrooxidans isolated from Wadalianchi volcanic lake, northeast China. Electronic Journal of Biotechnology 25 (2017) 50-57.

Zhao, Hong; Jun Wang, Xiaowen Gan, Minghao Hu, Erxing Zhang, Wenqing Qin, Guanzhou Qiu. Cooperative bioleaching of chalcoyrite and silver-bearing tailing by mixed moderately thermophilic culture: An emphasis on the chalcopyrite dissolution with XPS and electrochemical analysis. Mineral Engineering 81 (2015) 29-39.

MODELO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE SENSOR DE VELOCIDAD DE PARTÍCULAS ACÚSTICAS PARA APLICACIONES EN INFRASONIDOS

Joaquín García, Diego Pérez[a], Martin Gómez[ab]

[a]*ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA*
[b] *Grupo de Emisión Acústica, FRD, UTN, ARGENTINA.*

e-mail: joaquingarcia@cnea.gob.ar

RESUMEN

La velocidad de las partículas acústicas (u) es una magnitud complementaria a la presión (p), típicamente medida en una onda acústica, que proporciona información extra sobre la dirección de propagación de la energía. Cuando tanto p y u se pueden medir, la intensidad (energía) e impedancia acústica pueden ser caracterizadas. Este trabajo se centra en el diseño y construcción de un prototipo de sensor MEMS sensible a la velocidad de partículas acústicas para aplicaciones en infrasonido. Basado en sensores de flujo, utiliza un principio térmico de dos filamentos metálicos calientes. Cuando una onda acústica pasa a través de ellos, un filamento se enfría y el otro se calienta por convección forzada generando un cambio diferencial de temperatura (ΔT) y por lo tanto de resistividad eléctrica que es proporcional a la velocidad del fluido. Se llevaron a cabo simulaciones numéricas con el método de elementos finitos (MEF) para evaluar los parámetros geométricos que más influyen en maximizar el ΔT y, por lo tanto, la sensibilidad del dispositivo en régimen estacionario. Se construyó un prototipo utilizando técnicas de microfabricación en sala limpia. El proceso implicó caracterizar técnicas de fotolitografía y ataque en seco en obleas de Si <100>. Se realizaron mediciones preliminares en los dispositivos construidos en términos de la resistencia eléctrica de los filamentos y los resultados se compararon con simulaciones y literatura previa.

Palabras Clave: Velocidad de Partículas Acústicas, Infrasonido, MEF, MEMS, Flujo de Calor

INTRODUCCIÓN

A la hora de medir ondas acústicas, la magnitud más utilizada es la presión sonora (*p*), normalmente medida con micrófonos. Al tratarse de un escalar, en ocasiones resulta insuficiente para caracterizar completamente el medio acústico de propagación de las ondas. La velocidad de las partículas acústicas (*u*) es una cantidad vectorial que complementa la información de presión y permite obtener un mayor conocimiento sobre el campo acústico. Por ejemplo, la relación entre presión y velocidad da la impedancia acústica, que es una medida de la oposición del medio a la propagación de la onda. Otra cantidad útil es la intensidad acústica definida como el producto entre la presión y la velocidad, que proporciona información sobre la propagación de la energía y es esencial en aplicaciones como la localización de fuentes acústicas donde se debe detectar la dirección de llegada. Se han propuesto diferentes métodos para las mediciones de *u*, incluidas estimaciones indirectas utilizando gradientes de presión y métodos directos con anemometría láser Doppler y sensores de flujo térmico (Elwenspoek 1999).

En los últimos años se han desarrollado muchas aplicaciones de sensores basados en sistemas microelectromecánicos (MEMS). Este proceso permite bajos costos de fabricación y pequeñas estructuras que pueden dar lugar a transductores más eficientes. Los sensores de flujo térmico se basan en el anemómetro clásico donde los cambios de temperatura de un alambre calentado se utilizan para estimar la velocidad de un fluido (Bruun 1996). Para

aplicaciones acústicas, el primer sensor térmico fue propuesto por De Bree et al. y posteriormente varios autores propusieron modelos diferentes y novedosos que mejoran la sensibilidad y cubren diversas aplicaciones (de Bree 1997). Sin embargo, la mayoría de ellos se centran en el rango audible o en ultrasonidos y no se han realizado muchos trabajos para optimizar la respuesta para aplicaciones de infrasonidos. Esto es importante para el grupo ICES (Centro Internacional de Ciencias de la Tierra) para complementar las estaciones de monitoreo existentes en volcanes y para la actividad sísmica donde normalmente solo se realizan mediciones de presión.
En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sensor APV orientado para aplicaciones de infrasonidos (por debajo de 20 Hz). El dispositivo, directamente sensible a la velocidad del aire, consiste en un calefactor central con dos microfilamentos sensores a ambos lados. Se realizó un modelo numérico para investigar el comportamiento térmico y la interacción con una onda acústica utilizando el método de elementos finitos. Se desarrolló un modelo 3D y se estudió la sensibilidad en régimen estacionario evaluando distintas velocidades de flujo de aire para definir los parámetros geométricos óptimos del sensor. Se construyó un prototipo sobre una oblea de silicio mediante técnicas de microfabricación en una sala limpia y se caracterizaron las técnicas involucradas en el proceso. Se realizaron mediciones de la resistencia eléctrica de los filamentos y se compararon con simulaciones y literatura previa.

TEORÍA

El principio de funcionamiento del sensor propuesto implica mecanismos de transferencia de calor por: conductividad, radiación y convección. Los dos primeros pueden omitirse debido a la alta relación de aspecto longitud/anchura de los filamentos, lo que da como resultado una superficie pequeña para la conducción y la radiación. Además, el metal se deposita en una capa de dióxido de silicio SiO_2 que actúa como aislante térmico. La ecuación del balance de calor se puede escribir como (Ghiaasiaan 2011):

$$\rho c_p . v \nabla T - k \nabla^2 T = Q \tag{1}$$

Donde Q es la fuente de calor del calentador, v la velocidad del fluido (aire), ρ la densidad y el calor específico del aire y ∇T es el gradiente de temperatura entre los filamentos ascendentes y descendentes. Se supone que el fluido es newtoniano con densidad y viscosidad constantes y que los filamentos tienen una distribución uniforme de temperatura.

Cuando una onda plana acústica se propaga a través de los filamentos, la velocidad del fluido adopta un comportamiento armónico:

$$v = u = \bar{u} e^{jwt} \tag{2}$$

provocando una distribución de temperatura asimétrica en la Ec. (1) debido al término de convección proporcional a v. La ecuación del balance de calor se resuelve en este trabajo mediante métodos numéricos utilizando el método de elementos finitos (MEF) y considerando los efectos termo-viscosos de las capas límite.

MODELO NUMÉRICO

Se realizó un modelo numérico utilizando COMSOL Multiphysics que consiste en tres filamentos, un calefactor central y dos filamentos sensores en ambos lados, con las dimensiones enumeradas en la Tabla 1. Los filamentos se componen de una fina capa de platino sobre un sustrato de SiO_2 y todo se encuentra inmerso dentro de un volumen de aire

cúbico de 2 x 2 mm. (Fig. 1). Se estableció un modelo 3D para estudios estacionarios. La estrategia para la simulación numérica se realizó de la siguiente manera:

- *Paso estacionario (temperaturas):* Se desarrolló y aplicó un modelo 3D utilizando los *módulos de Transferencia de Calor y Corriente Eléctrica*. El calefactor se fijó a una temperatura en un rango de 200 - 400 ºC aplicando una tensión eléctrica de 0-500 mV entre terminales. El perfil de temperatura se obtuvo a lo largo del volumen de aire. Se aplicó una pequeña corriente (μA) a los terminales del sensor para medir sus valores de resistencia eléctrica según la ley de Ohm.
- *Paso del dominio de frecuencia (flujo de aire):* La temperatura promedio del calefactor elegida en el paso anterior se usó para establecer un valor fijo de temperatura inicial del calefactor. Con el fluido en reposo, se utilizó el *módulo de flujo laminar* para aplicar flujos de aire DC como así también variables (correspondiente a ondas acústicas). Las paredes se consideraron sin deslizamiento y con condiciones de contorno isotérmicas que permiten tener en cuenta las pérdidas térmicas y viscosas cerca de las superficies debido a las pequeñas dimensiones del dispositivo (Ghiaasiaan 2011). El perfil de temperatura se obtuvo para un rango de velocidades de 0.0024 a 500 mm/s.

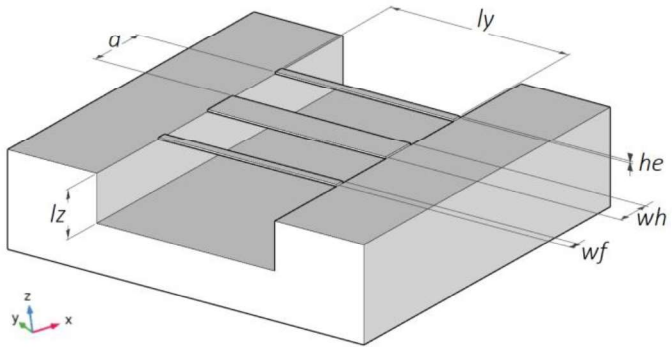


Figura 1. Vista axonométrica del modelo 3D con los parámetros geométricos.

Las condiciones de contorno aplicadas fueron: temperatura ambiente (20 °C) para las paredes del volumen de aire y una condición de flujo de calor convectivo natural considerando un coeficiente de convección del aire como h = 5 W/m^{2}K. Las caras izquierda y derecha, paralelas a los filamentos, se configuraron como entrada y salida respectivamente para el flujo de calor y el flujo de aire.

El ΔT es proporcional a la sensibilidad del dispositivo y depende en gran medida de la configuración geométrica de los filamentos (de Bree 1997)(Pjetri et al. 2016)(Benvenuti et al. 2021). Se evaluaron distintas configuraciones (Tabla I) como separación de filamentos (*a*), ancho (*wf*) y espesor (*he*), para analizar las influencias en la respuesta en frecuencia.

Tabla I. Dimensiones del sensor.

Parámetro	Dimensión [μm]	Descripción
wf	5 - 20	Ancho fil. sensor
wh	100	Ancho fil. calefactor
a	20 - 400	Separacion entre fil.
he	0,1 – 0,3	Espesor de filamento
ly	1000	Largo de filamento
lz	400	Profundidad de ventanas

 ISBN: 978-987-1323-89-0

PROTOTIPO EXPERIMENTAL

Tras la evaluación de los parámetros geométricos más importantes con el modelo numérico, se construyó un prototipo físico aplicando técnicas de microfabricación en sala limpia. Se implementó una oblea de silicio Si <100> con una capa de óxido de SiO_2 cultivada térmicamente (400 nm). El proceso se resume en la Fig. 2. Primero, se depositó una película delgada de una fotoresina polimérica en la oblea mediante un proceso de centrifugación (b). Se aplicó una fotomáscara con los patrones del sensor (previamente impresos en una filmina) para exponer parte del área del fotorresistente a la luz ultravioleta (UV) (c). Se depositó una fina capa metálica de 200 nm (50 nm Cr/ 150 nm Pt) mediante evaporación de plasma en una cámara de vacío (10-2 mBar) (e).

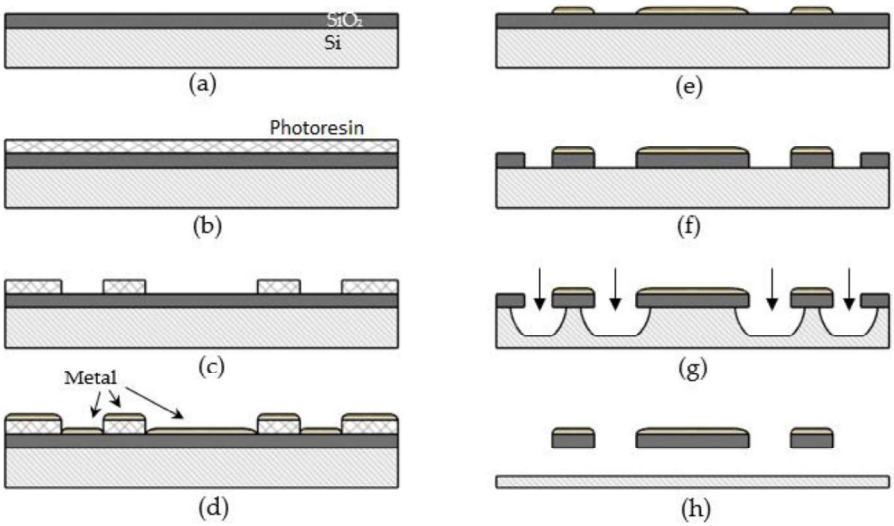


Figura 2. Proceso de microfabricación (vista en plano zx de la Fig. 1).

Se aplicó un proceso de despegue o *lift-off* consistente en sumergir la oblea en acetona para eliminar todo el metal depositado sobre la fotoresina (e). Una vez obtenidos los patrones de los filamentos metálicos se aplicó una segunda litografía para conformar las ventanas del canal y proteger los filamentos de la siguiente etapa. Se implementó un ataque en seco por iones reactivos (RIE), para liberar los filamentos. Primero se utilizó un paso anisotrópico para eliminar la capa de SiO_2 con iones de argón (Ar) generados por un plasma en una cámara de vacío (15 mTorr). Los iones son acelerados por una lente para impactar el sustrato y eliminar el SiO_2 en las áreas expuestas. La inclusión de gas C_4F_8 genera productos volátiles (SiF_4) en la superficie de la oblea que se difunden hacia el plasma y son bombeados fuera de la cámara.

El segundo proceso RIE fue un paso isotrópico para eliminar el Si debajo de los filamentos. En este caso se produjo un fenómeno de combinación físico y químico. Además del impacto físico de los iones Ar, la inclusión de gas SF_6 colabora a la remoción isotrópica debido a la reacción química entre Si y F para generar productos volátiles (SiF_4) en mayor proporción que el paso anterior. Finalmente, los filamentos quedaron suspendidos como puentes de 1 mm de longitud. Las dimensiones finales son las enumeradas en la Tabla 1, con wf = 5, 10 y 20 μm y a = 50, 100, 200 y 400 μm.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

RESULTADOS

RESULTADOS DE SIMULACIONES NUMÉRICAS

CONDICIÓN ESTACIONARIA

La distribución de temperatura en el volumen y los filamentos se muestra en la Fig. 3. La temperatura a lo largo del calentador es uniforme, aunque se espera una caída en los extremos como se denota en trabajos anteriores (Benvenuti et al. 2021)(Shen et al. 2017). Esto se debe a que en un dispositivo real los filamentos están soportados sobre el material de silicio base y por simplicidad en esta simulación no se incluyó. Además, el análisis de temperatura posterior se realiza considerando los valores medios a lo largo de todos los filamentos. La distribución de la temperatura del aire es simétrica con respecto a la posición del calefactor y no se considera ningún flujo de aire.

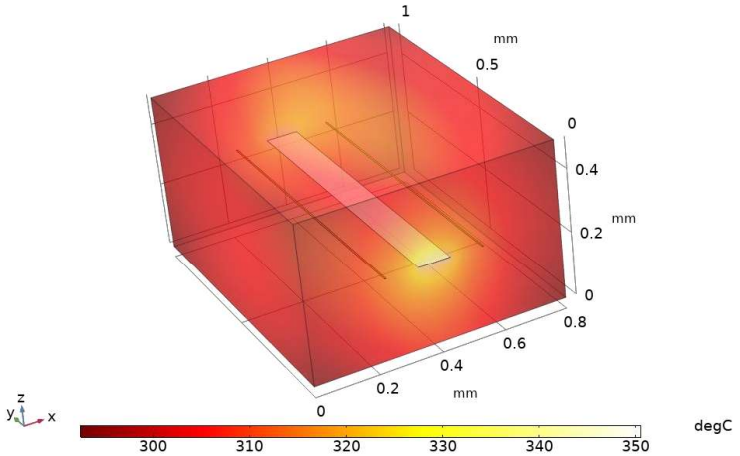


Figura 3. Distribución de temperatura con un suministro de tensión en el calentador de 0,3 V.

La temperatura del calefactor en función de la tension aplicada se muestra en la Fig. 4 (a). El comportamiento es lineal en el rango de temperatura de interés (200 – 400 ºC). La dependencia de la resistencia del filamento del sensor con la temperatura del calentador se muestra en la Fig. 4 (b). Como se puede observar la resistencia eléctrica de los sensores muestra un comportamiento lineal, directamente proporcional a la temperatura como se esperaba (Se-Hun, James F. Shackelford, Young-Hwan Han 2016). La temperatura del calentador se fijó en 350 ºC correspondiente a 0,3 V de tension aplicada.

Después de establecer la polarización del calentador, se aplicó un flujo de aire CC de izquierda a derecha del volumen de aire (Fig. 5). Se consideró un rango de velocidades de 0.0024 a 500 mm/s que corresponden a un nivel de presión sonora de 0 a 140 dB respectivamente, considerando una onda plana propagativa. El perfil de temperatura a lo largo de la dirección *x* se muestra en la Fig. 6 para diferentes velocidades de flujo de aire. Como se puede observar la temperatura del calentador es casi constante a lo largo de su ancho y al aumentar la velocidad del flujo, la temperatura desciende.

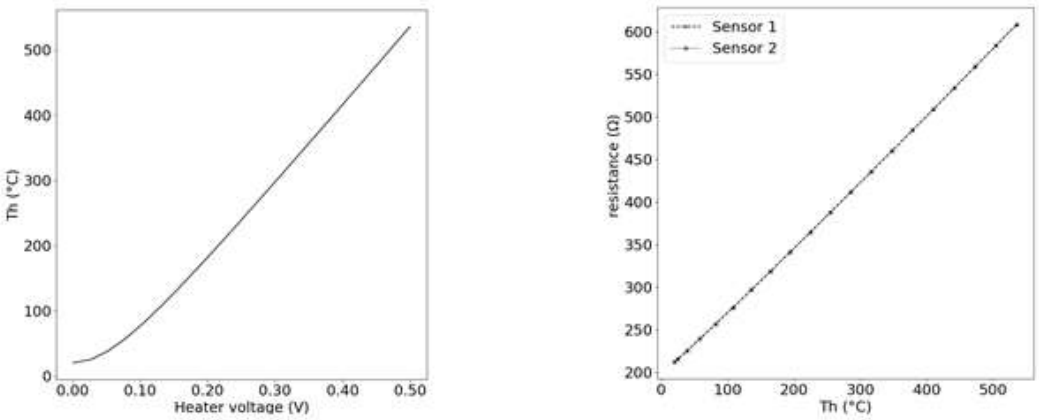


Figura 4. (a) Temperatura del calefactor en función de la tensión aplicada y **(b)** dependencia de la temperatura de la resistencia del sensor.

Los sensores están ubicados en posiciones de 0,3 y 0,5 mm en el eje *x*. La temperatura en cada sensor se calculó como el valor promedio a lo largo del filamento. La temperatura diferencial entre sensores (ΔT), proporcional a la sensibilidad, aumenta con la velocidad del flujo. Esto es más notable en la Fig. 7, donde el ΔT se representa frente a la velocidad del flujo.

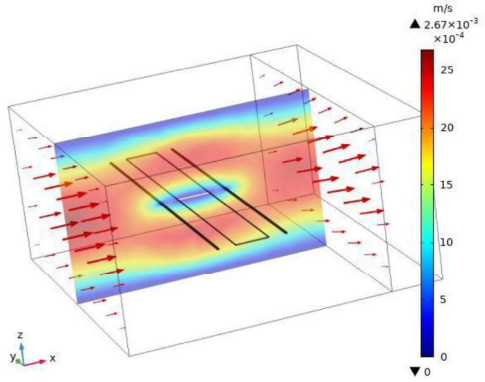


Figura 5. Perfil de velocidades de flujo de aire en dirección transversal a los filamentos.

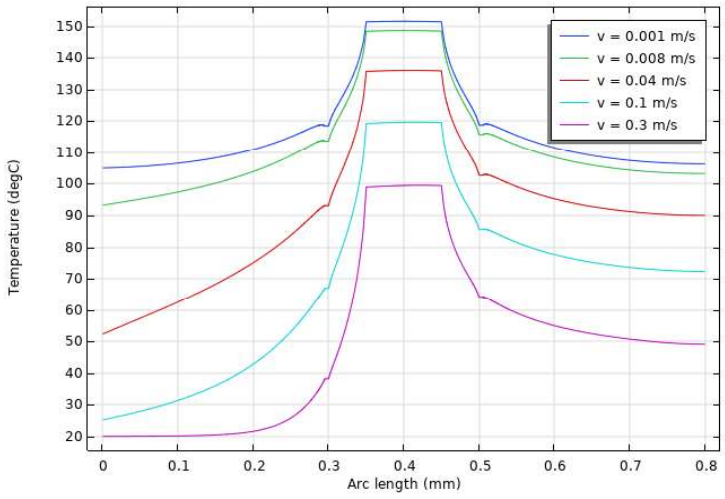


Figura 6. Perfil de temperatura en un corte plano *zx* del volumen de aire para diferentes velocidades de flujo de aire de entrada.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

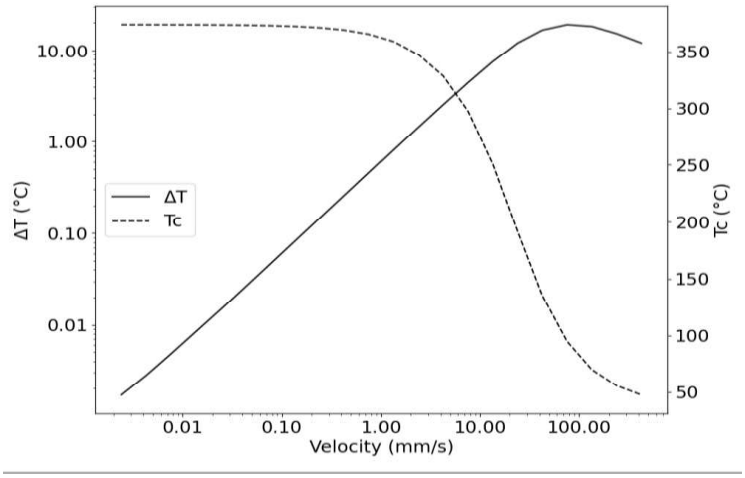


Figura 7. Temperatura diferencial (ΔT) entre sensores en línea continua para diferentes velocidades de flujo. En líneas discontinuas la temperatura del calefactor (Tc)

El ΔT muestra un comportamiento lineal con *v* para velocidades de flujo pequeñas de hasta 20 mm/s. Para valores mayores el ΔT presenta un máximo después del cual disminuye. Esto podría deberse a la influencia de la capa límite térmica y viscosa (Tas et al. 2000). Esta capa se vuelve más delgada con el aumento de *v* e implica líneas isotérmicas comprimidas alrededor del calentador que se extienden a lo largo de toda su longitud, por lo que provoca una caída de su temperatura. Esto se muestra con la curva de línea discontinua en la Fig. 7. La temperatura del calentador permanece constante para *v* pequeña y luego muestra una caída cuando se alcanza una cierta velocidad de flujo. En estos términos se considera 50 mm/s como velocidad máxima operativa del sensor. La velocidad mínima es un orden de magnitud menor que la típica en anemómetros de filamento caliente (Bruun 1996). El comienzo del comportamiento no lineal de ΔT coincide con la velocidad a la que la temperatura del calentador comienza a descender. La dependencia es con $1/\sqrt{v}$. En la región lineal de la curva ΔT, la temperatura del calentador no depende de *v*. Este comportamiento también fue observado en (Lammerink et al. 1993).

Se encontró que la resistencia eléctrica diferencial entre filamentos es proporcional a las variaciones de temperatura con un factor de $\Delta R \approx 0{,}83\ \Delta T$. Además, para cada frecuencia existe una separacion optima (a_0) (entre filamento y calefactor) para la cual la sensibilidad del sensor ΔT adopta un valor maximo. La Fig. 8 muestra una a_0 de 0,45 mm para 10 Hz y 0,35 mm para 250 Hz. En base a esto se establece que para el rango de infrasonidos el valor de *a* deberia estar por encima de los 0,4 mm.

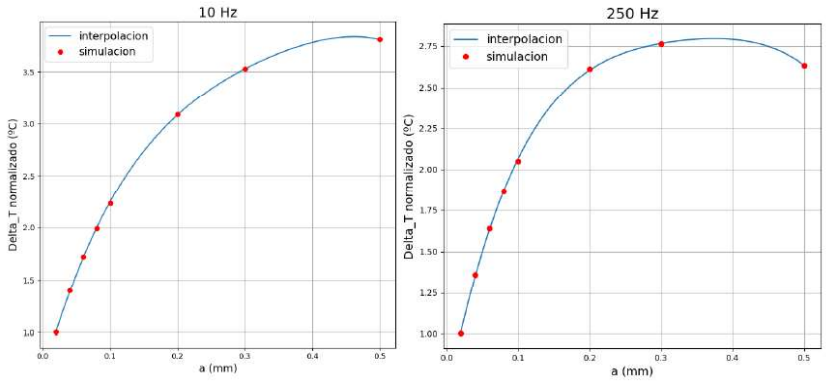


Figura 8. ΔT en función de la separación entre filamento sensor y calefactor.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

RESULTADOS EXPERIMENTALES

El proceso de microfabricación se caracterizó y ajustó realizando mediciones geométricas de los microdispositivos con un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y un perfilómetro mecánico de contacto. El ancho final de los filamentos resultó con una variación de aproximadamente el 20% de los valores diseñados originales (Tabla 1). Esto se debió al uso de filmina de acetato con patrones impresos con láser en el proceso de fotomáscara que tiene menos resolución, pero es más económica para una fase de calibración del proceso (Fig. 9).

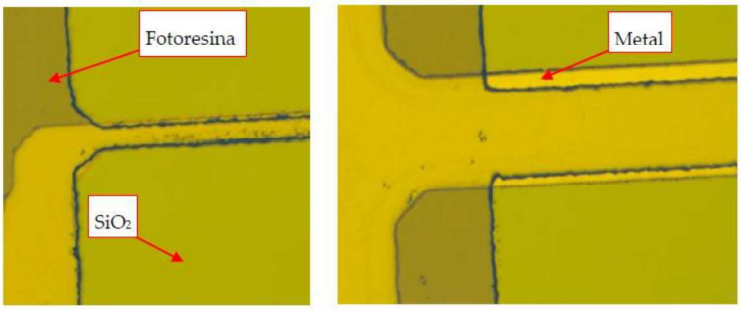


Figura 9. Segunda litografia cubriendo los filamentos metalicos previos al ataque RIE. Se pueden ver las variaciones de cobertura debido al uso de filmina en la mascara.

La liberación del filamento después del proceso RIE se comprobó con el SEM, junto con la profundidad del canal (120 - 150 µm) tanto en el SEM como en el perfilómetro. La Fig. 10 muestra la curva del perfil de profundidades obtenido en un rango de 0,5 mm de longitud en el perfilómetro de contacto.

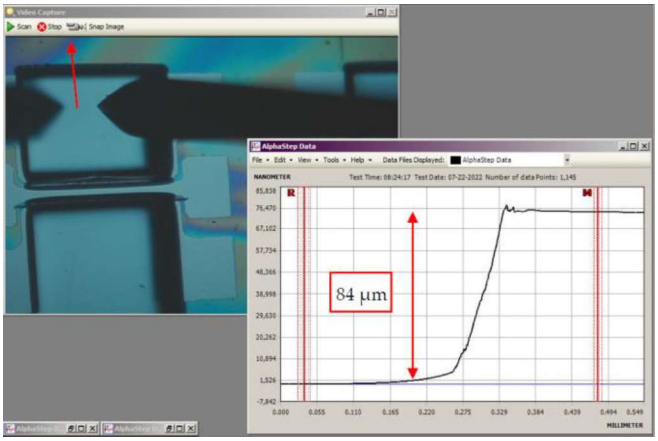


Figura 10. Medición de profundidad de ventana con el perfilómetro de contacto KLA Tencor D-120.

La variación de profundidad se debió al tiempo de exposición al grabado seco RIE isotrópico. El tiempo optimo se ajustó experimentalmente en dos pasos de 10 min con 2 min de enfriamiento de la cámara entre cada intervalo, presión de la cámara de 2 mTorr, temperatura -5 ºC, RF = 10W e ICP = 350 W. Además, si este tiempo era demasiado extenso se corría el riesgo de dañar la oblea como se muestra en la Fig. 11. A la izquierda se puede ver la oblea dañada por sobreexposición y a la derecha los filamentos liberados aplicando los tiempos y parámetros correctos. Disminuir la temperatura de la cámara debajo de 0 ºC ayudo a conservar la integridad de la fotoresina en todo el proceso.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

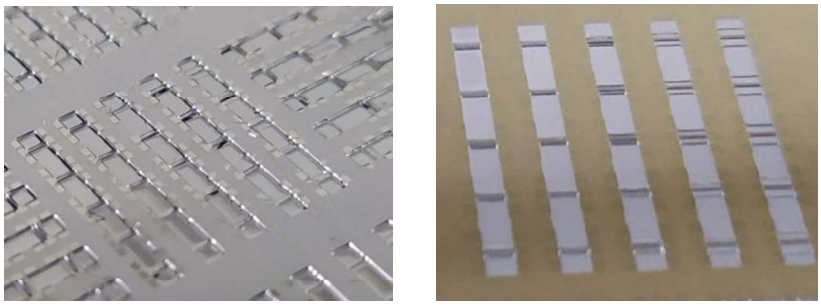


Figura 11. (izquierda) Oblea con daños por sobreexposición (se puede ver que lo plateado es todo Si). (derecha) Oblea con los filamentos liberados exitosamente.

En la Fig. 12 se muestra un sensor individual con cuatro sondas terminales, que corresponde a una Estación de Sonda Mecánica utilizada para realizar mediciones eléctricas en los dispositivos obtenidos.

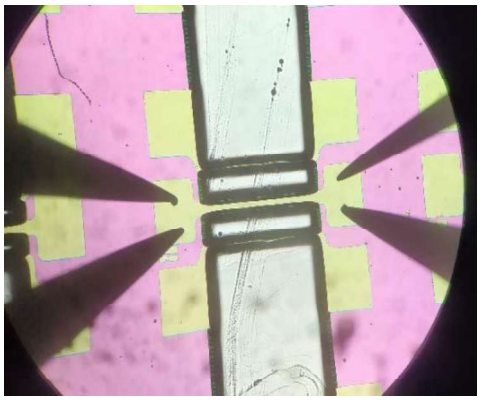


Figura 12. Micrografía de sensor individual con cuatro sondas mecánicas para realizar mediciones eléctricas (derecha).

Las cuatro sondas se utilizaron para realizar mediciones de resistencia eléctrica en cada filamento. Dos sondas aplicaron una tensión (V) entre terminales y las otras dos midieron la corriente eléctrica (I). Se encontró una dependencia lineal de la resistencia eléctrica en un rango de -10 a 10 V. Se realizaron varias mediciones en 37 dispositivos en la oblea, lo que dio como resultado una resistencia media de 4400 Ω para los calentadores y 21,5 kΩ para los filamentos del sensor con una desviación estándar de ± 980 Ω y ± 2200 Ω respectivamente.

El comportamiento fue lineal como se esperaba, aunque los valores fueron aproximadamente tres órdenes de magnitud más altos que las simulaciones (R_{heater} = 24 Ω y R_{sensor} = 450 Ω). Esto podría atribuirse a efectos piezoresistivos debido a la tensión residual observada en los filamentos liberados. La razón principal es que la capa estructural de SiO_2 mantiene cierta tensión de compresión debido al proceso de fabricación, ya que es un óxido cultivado térmicamente. Esto se confirmó en obleas vírgenes midiendo la curvatura con un perfilómetro de contacto (Profilers, n.d.). Para futuros lotes es deseable fabricar obleas libres de tensión añadiendo una capa de nitruro (Si_3N_4) que proporcione soporte estructural (Madou 2018). Se espera que esto proporcione mayor resistencia estructural y una mejora en las mediciones de resistencia de los filamentos con valores más correlacionados con las simulaciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló el diseño y construcción de un sensor de velocidad de partículas para aplicaciones en infrasonidos. Se realizó un modelo numérico utilizando

métodos de elementos finitos para estimar el ΔT entre filamentos (sensibilidad), la respuesta de frecuencia del dispositivo y evaluar los parámetros geométricos que la maximizan para el rango de infrasonidos. Se encontró que la resistencia diferencial ΔR del filamento es proporcional al ΔT. El rango de velocidades de operación se estableció en la zona lineal de la curva de la Fig. 7, pudiendo medir velocidades mas bajas que los anemómetros de hilo caliente y velocidades máximas que satisfacen el rango de interés (equivalente a niveles de presión sonora > 120 dB en campo libre). La separación entre filamentos juega un papel importante en la sensibilidad, mejorando la respuesta de baja frecuencia para separaciones más grandes. Los procesos de microfabricacion pudieron ser caracterizados y ajustados exitosamente. Los dispositivos obtenidos luego del proceso de microfabricación mostraron una resistencia eléctrica del filamento mayor a la simulada, posiblemente debido a efectos piezoresistivos en los filamentos que resultaron con tensiones residuales. Esto era de esperarse debido a la capa de óxido de SiO_2 crecida térmicamente que permanece como tensión residual del proceso de fabricación. Este aspecto se pretende mejorar en futuras versiones utilizando obleas libres de tensiones con una capa de nitruro de silicio Si_3N_4 que aporten rigidez a la capa de SiO_2.

En futuras implementaciones se utilizarán obleas de libre estrés y se estudiara el comportamiento temporal del sensor. Además, se incluirán las instrumentaciones electrónicas para realizar mediciones de flujo.

REFERENCIAS

Benvenuti, L., A. Catania, P. Bruschi, and M. Piotto. 2021. "Modeling and Optimization of Directive Acoustical Particle Velocity Sensors for Ultrasonic Applications." *Sensors and Actuators, A: Physical* 318: 112504. https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112504.

Bree, Hans-Elias de. 1997. *The Microflown*. https://pdfs.semanticscholar.org/2b35/1439a475652ca9521a1529823eeb2073b6cf.pdf%5Cnhttp://eprints.eemcs.utwente.nl/10771/01/Hans_Elias_de_Bree1.pdf.

Bruun, H H. 1996. "Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis." *Measurement Science and Technology*. https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/10/024.

Elwenspoek, M. 1999. "Thermal Flow Micro Sensors." *Proceedings of the International Semiconductor Conference, CAS* 2 (November 1999): 423–35. https://doi.org/10.1109/smicnd.1999.810580.

Ghiaasiaan, S. Mostafa. 2011. *Convective Heat and Mass Transfer*. *Convective Heat and Mass Transfer*. Vol. 9781107003. https://doi.org/10.1017/CBO9780511800603.

Lammerink, Theo S J, Nlels R Tas, Mlko Elwenspoek, and Jan H J Flultman. 1993. "Micro-Liquid Flow Sensor" 38: 45–50.

Madou, Marc J. 2018. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology, Volume II*. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology, Three-Volume Set*. https://doi.org/10.1201/9781315274164.

Pjetri, O., R. J. Wiegerink, T. S.J. Lammerink, and G. J.M. Krijnen. 2016. "A 2D Acoustic Particle Velocity Sensor with Perfectly Orthogonal Sensitivity Directions." *Sensors and Actuators, A: Physical* 246: 28–34. https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.04.023.

Profilers, P-series. n.d. "Thin Film Stress Measurements Using KLA-Tencor Stylus Based Profilers."

Se-Hun, James F. Shackelford, Young-Hwan Han, Sukyoung Kim. 2016. *CRC ENGINEERING SCIENCE and MATERIALS HANDBOOK*. Taylor & Francis Group, LLC.

Shen, Jie-nan, Bao-lin Liu, Lin-hui Zhu, Ma-hui Xu, and Yi-bo Zeng. 2017. "Numerical Analysis of the Performance of the Performance of Microflown with SHS Configuration," 1–5.

Tas, Niels R., Theo S. J. Lammerink, Pele J. Leussink, J. W. Berenschot, H. E. de Bree, and Miko C. Elwenspoek. 2000. "Toward Thermal Flow-Sensing with PL/s Resolution." *Micromachined Devices and Components VI* 4176 (August): 106–21.

ESTIMACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE MAGNETIZACIÓN POR MÉTODOS INDIRECTOS

Julián L. Gómez[a,b] y Ana Carolina Pedraza De Marchi[a,b,c]

[a]*UNLP,Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[b]*CONICET, ARGENTINA*
[c]*CIG,Centro de Investigaciones Geológicas, ARGENTINA*

e-mail: jgomez@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

La interpretación de anomalías de intensidad total escalar requiere del conocimiento de la dirección de la magnetización de los cuerpos que las originan. Debido a que la descripción de las fuentes que generan la anomalía es por lo general incompleta, es común suponer magnetización puramente inducida. Sin embargo, la presencia de magnetización remanente puede afectar el procesamiento de las observaciones y su posterior interpretación. En los últimos años se han propuesto varios métodos para inferir la inclinación y declinación del vector de polarización magnética a partir de la anomalía escalar. En este trabajo analizamos tres alternativas denominadas: Max-Min, COR y NNLS. Max-Min maximiza los mínimos de la reducción al polo RTP. COR optimiza la correlación entre la magnitud del gradiente espacial y la derivada vertical de la RTP. NNLS, consiste en aplicar un método de inversión no lineal que utiliza como modelo directo el método de la capa equivalente y el algoritmo de optimización de mínimos cuadrados con condición de no negatividad. En un primer análisis, construimos un ejemplo sintético sencillo para evaluar las estimaciones de la dirección de la magnetización de todos los métodos. Consideramos situaciones de magnetización inducida y de magnetización remanente. Por último, contrastamos ambos métodos utilizando datos reales del complejo Montes Claros de la provincia de Goiás, Brasil. Los tres métodos aplicados lograron obtener buenas estimaciones de la dirección de magnetización en todos los casos. En este trabajo se sugiere utilizar COR y Max-Min para proporcionar una dirección de magnetización inicial al método NNLS y reducir el riesgo de la no convergencia debido a la condición inicial de partida.

Palabras Clave: Anomalía Magnética, Dirección de Magnetización, Optimización.

INTRODUCCIÓN

Los métodos potenciales de prospección desempeñan un papel importante en la exploración del petróleo y el gas, las aplicaciones mineras y la cartografía (Biegert et al., 1998; Nabighian et al., 2005; Vatankhah et al., 2022; Liu et al., 2022), entre otras aplicaciones. La prospección magnética involucra el procesamiento y la inversión de los datos de anomalías magnéticas de intensidad total escalar (TFA, por sus siglas en inglés) que requieren de información a priori sobre la dirección de la magnetización total. El problema de determinar la dirección de la magnetización total y los efectos de la remanencia de la TFA ha sido, durante mucho tiempo, un problema de la interpretación magnética que ha motivado a varios autores (Roest y Pilkington, 1993; Haney y Li, 2022) a explorarlo con diferentes métodos. Para muchas técnicas de interpretación, es indispensable que la dirección de la magnetización sea estimada adecuadamente. La magnetización total en un cuerpo fuente es la suma vectorial de la magnetización inducida y remanente. Debido a que la descripción de las fuentes que generan la TFA es por lo general incompleta, es común suponer magnetización puramente inducida. Sin embargo, una fuerte magnetización remanente desvía la dirección de la magnetización total respecto de esta. Dentro de las operaciones que pueden aplicarse a la TFA para su procesamiento, se halla la reducción al polo (RTP, por sus siglas en inglés) (Baranov y Naudy, 1964; Pierre Keating y L. Zerbo, 1996) en la que sí se considera solo la dirección del campo geomagnético, esta conducirá a

distribuciones de anomalías incorrectas y a una no adecuada interpretación de los bordes de cuerpos geológicos (Eldosouky et al., 2020). Los algoritmos de inversión magnética persiguen el objetivo principal de modelar la magnetización y calcular la distribución de susceptibilidades magnéticas asociadas, siendo estos muy dependientes de la intensidad y dirección de la magnetización total (Wang et al., 2022) en los que ignorar la influencia de la magnetización remanente conduce a distribuciones incorrectas (Li et al., 2010) y por ello es fundamental obtener información precisa sobre la dirección de la magnetización total. En este trabajo se exploran tres métodos indirectos para determinarla a partir del procesamiento directo de la TFA, Max-Min, COR y NNLS. Max-Min (Liu et al., 2020; Wang et al, 2022), el cual se basa en valores extremos de la RTP, fue propuesto inicialmente por Fedi et al. (1994) con el análisis de distorsión para obtener la dirección de magnetización, basándose en áreas de anomalías negativas pequeñas o casi insignificantes en el campo RTP de la dirección de magnetización con los parámetros correctos. A diferencia de los métodos de correlación cruzada que sólo obtienen resultados aproximados, este método al menos teóricamente puede estimar la dirección de magnetización correcta. COR (Dannemiller y Li, 2006) se basa en la correlación entre magnitud total del gradiente espacial y la derivada primera vertical de la RTP. Una desventaja de los métodos que utilizan la RTP es la inestabilidad numérica de la transformación en el dominio de la frecuencia a baja inclinación. Ribeiro-Filho et al. (2020) muestran cómo mejorar esta inestabilidad utilizando capas magnéticas equivalentes para valores absolutos del ángulo de inclinación menores a 15° y la RTP convencional en el dominio de Fourier para otros ángulos, y luego utilizando un método de correlación cruzada para estimar la dirección de la magnetización total. Finalmente, NNLS (Reis et al., 2020), se basa en una inversión no lineal con condición de no negatividad. En este método, la dirección de magnetización inicial se determina primero, y momentos dipolares magnéticos se calculan utilizando mínimos cuadrados no negativos mediante una capa magnética equivalente (Dampney, 1969; Emilia y Massey, 1974; Li y Oldenburg, 2010). Esta capa no es más que una abstracción matemática carente de significado geológico, ya que no hay relación entre la distribución de propiedades físicas en la capa y las fuentes geológicas reales (Reis et al., 2020). Pocos autores de la literatura de exploración geofísica (Pedersen, 1991; Silva et al. ,2010) han abordado el uso de la técnica de la capa equivalente para interpretar las fuentes geológicas. NNLS calcula el incremento de la dirección de magnetización por medio del método de Levenberg-Marquardt e itera hasta que la función objetivo se reduce de manera sostenida y hasta alcanzar un criterio de estabilidad. En este trabajo en primer lugar resumimos las ideas principales de la teoría de los métodos Max-Min, COR y NNLS. Luego, discutimos la implementación de estos en un ejemplo sintético probando su eficacia en presencia de magnetización inducida y remanente. Por último, aplicamos los métodos a datos de campo.

MÉTODOS

MAXMIN

Una de las operaciones que pueden aplicarse a los datos magnéticos es la RTP, la cual transforma las anomalías de campo total medidas a la que generaría una magnetización que tiene la misma magnitud, pero está orientada en la dirección vertical. La transformación RTP sólo puede realizarse correctamente cuando se conoce la dirección de la magnetización total. La operación RTP puede aplicarse numéricamente si se utiliza una dirección incorrecta, pero el campo resultante será, en general, más asimétrico que el campo RTP calculado con los mejores estimadores de los parámetros correctos. El problema de encontrar la dirección correcta consiste en determinar cuándo el campo RTP resultante es el menos asimétrico (Dannemiller et al., 2006). Cuando la anomalía ha sido reducida utilizando la dirección de magnetización correcta, la RTP obtenida muestra anomalías positivas en el centro de la fuente y despreciables anomalías negativas alejadas de ella (Liu, 2022). Este método señala que el máximo de los mínimos obtenidos en la RTP para distintos valores de inclinación (I) y declinación (D) indica un valor aproximado de la dirección de magnetización del cuerpo anómalo, lo que puede expresarse como:

$$\{I*, D*\} = \text{argmax}_{I,D} \{\text{argmin} \{RTP\ (I, D)\}\} \quad (1)$$

siendo I∗, D∗ los mejores estimadores de ángulos de inclinación y declinación. Donde argmin y argmax son funciones que obtienen el índice del vector donde se alcanza el mínimo y el máximo, respectivamente.
El método Max-Min sólo requiere el cálculo de un atributo, la RTP y utiliza fuerza bruta para estimar la dirección de magnetización. Sin embargo, Liu et al. (2018; 2020) muestran que las estimaciones obtenidas por este método difieren considerablemente de las obtenidas por métodos de correlación (Dannemiller, 2006; Liu et al., 2015; Ribeiro-Filho et al., 2020), causando grandes errores para las aplicaciones a datos reales. Max-Min es sensible a la relación señal/ruido (SNR, por sus siglas en inglés) de la TFA, situación que puede atenuarse considerando estrategias de filtrado como el empleo del filtro Wiener (Hansen y Pawbloski, 1989). La construcción del operador del filtro Wiener de la RTP requiere el conocimiento de la ordenada al origen y la pendiente de una recta ajustada en las bandas de números de onda altos y bajos, en el espectro de potencia logarítmica radial. Liu muestra que una forma de determinar estos parámetros es utilizando el algoritmo de aprendizaje no supervisado *K-means* (Macqueen, 1967) clasificando las bandas de números de onda altos y bajos del espectro.

COR

El método de correlación (COR) se basa en dos magnitudes comúnmente utilizadas en la interpretación de datos magnéticos: el gradiente vertical y el gradiente total del campo (GRAD) de la RTP. El GRAD es la magnitud del gradiente vertical del campo magnético en toda la gama de posibles direcciones de inducción y magnetización (Haney et al., 2003) y por lo tanto es el menos asimétrico entre los diferentes gradientes magnéticos. El GRAD puede calcularse fácilmente para problemas 2D (Nabighian, 1972), y puede utilizarse como referencia para calibrar el grado de simetría del gradiente vertical de RTP estimado. Para estudiar problemas en 3D, no puede calcularse sin conocer la verdadera dirección de la magnetización (Haney et al., 2003). Como resultado, no se cuenta con una referencia fija para la comparación en 3D. Sin embargo, el GRAD y el gradiente vertical de RTP alcanzan simultáneamente la máxima simetría cuando en el cálculo se utiliza una dirección de magnetización correcta, y por ende su correlación se maximiza. Siendo la correlación entre estos dos gradientes para un RTP arbitrario, distinto del calculado con los parámetros correctos, más débil. Por lo tanto, la correlación cruzada de las dos cantidades resulta eficaz para determinar el grado de simetría del gradiente vertical en 3D (Dannemiller et al., 2006). Dannemiller et al. (2006) afirman que puede asumirse que la comparación del gradiente vertical de la RTP con su GRAD permite encontrar la dirección de magnetización correcta, aunque no haya ninguna prueba analítica que demuestre que estas dos cantidades deben tener una correlación máxima para la verdadera dirección de magnetización y su utilidad práctica se confirme mediante observaciones empíricas.
En síntesis, el máximo en el mapa de correlación r(I, D) entre el GRAD espacial y el gradiente vertical de la RTP indica un valor aproximado a la dirección de magnetización (I∗, D∗) del cuerpo anómalo:

$$\{I*, D*\} = \text{argmax } \{r\ (I, D)\} \tag{2}$$

siendo I∗, D∗ los mejores estimadores de ángulos de inclinación y declinación.
Dado que COR requiere calcular la reducción RTP y la magnitud del GRAD en distintos pares (I, D), resulta más costoso que el método Max-Min al utilizar dos atributos en vez de uno. También hace uso de la fuerza bruta para estimar la dirección de magnetización, aunque tiene una menor sensibilidad a la SNR que el método Max-Min. Al igual que Max-Min, COR necesita grillar la TFA.

NNLS

NNLS es un algoritmo de inversión para estimar la inclinación y la declinación del campo producido por fuentes magnéticas anómalas. Para ello se utiliza un modelo dado por una capa equivalente (EQL, por sus siglas en inglés). La técnica de EQL consiste en aproximar los datos observados por los producidos por una capa de fuentes discretas (por ejemplo, prismas, dipolos o masas puntuales), que se conocen comúnmente como fuentes equivalentes. Los datos producidos por esta capa equivalente se denominan comúnmente datos predichos (Reis et al., 2020).

Se asume que los cuerpos anómalos tienen toda la misma dirección de magnetización y se requiere que esta dirección sea también compartida por la EQL, lo que conlleva a la restricción de momento magnéticos estrictamente positivos en la EQL. Es decir, NNLS busca estimar los momentos magnéticos **p**, inclinación I y declinación D que minimicen el error entre la TFA observada y la TFA(x,y,**p**) de la EQL modelada. Se utiliza el algoritmo de inversión anidada LM-NNLS, el cual se basa en resolver el problema en dos etapas. En una etapa se utiliza el algoritmo de mínimos cuadrados no negativos (NNLS, por sus siglas en inglés) para estimar **p** sujeto a la condición de no negatividad. En la segunda etapa se emplea el método de Levenberg-Marquard (LM) para estimar la dirección del campo magnetizante dada la estimación de **p**. La obtención de **p** requiere una solución inicial para la iteración k=0 para el proceso iterativo que resuelve el sistema de ecuaciones del algoritmo NNLS con una solución donde cada componente del vector **p** es no negativa. Para la obtención de la dirección de magnetización se calcula una corrección iterativa a la dirección de magnetización empleada en la etapa anterior, utilizando a su vez los momentos magnéticos estimados en la etapa anterior. Requiere de la definición de parámetros de ajuste o también llamados hiper parámetros, μ y λ. Se asume que los cuerpos anómalos tienen la misma dirección de magnetización. Para ajustar μ los autores (Reis et al., 2020) recomiendan utilizar el método de la curva L (*L-curve*), la cual consiste en realizar la inversión para una serie de valores de μ y elegir el resultado del gráfico en escala logarítmica entre la norma del vector de parámetros obtenidos, $\|\mathbf{s}*\|^2$, y la norma del residuo entre el dato observado y el dato predicho, por el modelo directo de la EQL que utiliza los parámetros estimados de la inversión. En dicho gráfico, si se observa una esquina (el vértice en la forma de una L) esta indica el parámetro de regularización óptimo, el cual establece un balance (*trade-off*) entre los términos de regularización y de bondad de ajuste en la función de costo. Como criterios de corte para terminar la iteración se evalúa la variación relativa de la función de costo, ψ, entre iteraciones y una dada tolerancia T. Sí sucede que $|\psi_{k+1}-\psi_k|/|\psi_k| \leqslant T$, entonces las iteraciones son terminadas. Este criterio se utiliza en ambos algoritmos, por lo tanto resultan dos criterios de corte como hiper parámetros: uno para el algoritmo NNLS y otro para el algoritmo LM. Los autores realizan un ajuste del parámetro μ en el algoritmo de LM según la variación de la función de costo entre iteraciones. En concreto, si $\psi_{k+1}-\psi_k>0$, entonces $\lambda \leftarrow \lambda \mathrm{d}\lambda$, caso contrario $\lambda \leftarrow \lambda/\mathrm{d}\lambda$, para un dado $\mathrm{d}\lambda>0$. Estos ajustes aceleran la convergencia. Prácticas similares son empleadas en el aprendizaje automático (*machine learning*, en inglés) para el ajuste del parámetro de aprendizaje. La inversión también es altamente sensible a los valores iniciales de la dirección de la magnetización I_0, D_0. Partir de una solución adecuada muchas veces es la garantía del éxito en la inversión. Considerando que en cada iteración estamos aproximando linealmente al modelo directo, es iterativo y por tanto la velocidad de convergencia depende de (I, D) iniciales. A diferencia de Max-Min y COR, este método no necesita grillar la TFA, permitiendo además interpretar los momentos dipolares obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EJEMPLOS SINTÉTICOS

Para la utilización de un modelo sintético programamos un algoritmo que calcula la TFA de un prisma recto rectangular semi infinito en la dirección vertical y con magnetización uniforme (Bhattacharyya, 1964). Dicha expresión puede ser utilizada para obtener la TFA (Figura 1) para los casos puramente inducido y remanente de un cuerpo con sección vertical finita z_2-z_1 siendo z_1 la cara superior del prisma y z_2 la cara inferior.

En las Figuras 2 y 3 se muestran los resultados de barrer todos los ángulos I y D posibles para los métodos Max-Min, COR y NNLS considerando casos de magnetización inducida (a) y remanente (b).

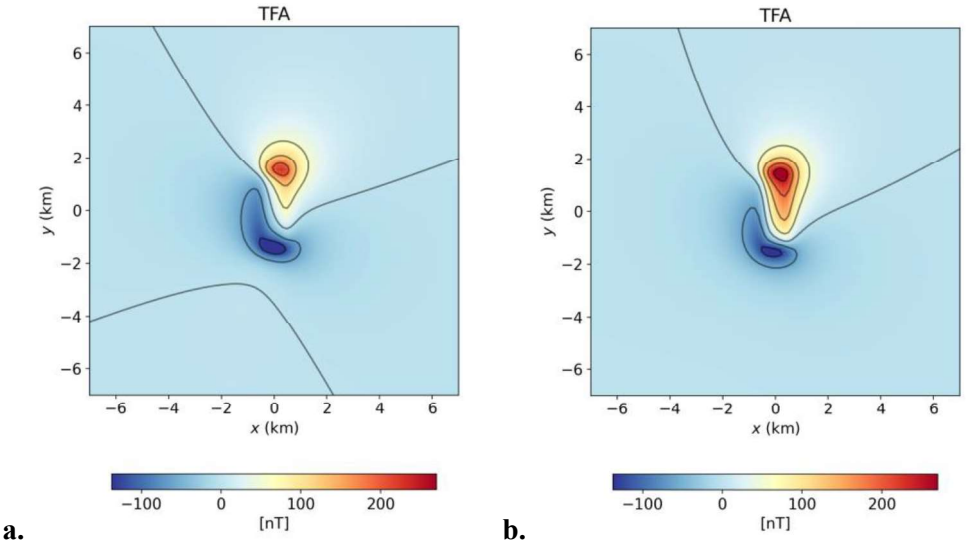


Figura 1. TFA de un cuerpo prismático 3D para (I_f, D_f) = (−30°, +20°). **a.** caso puramente inducido. **b.** caso remanente (I_m, D_m) = (−60°, +23°).

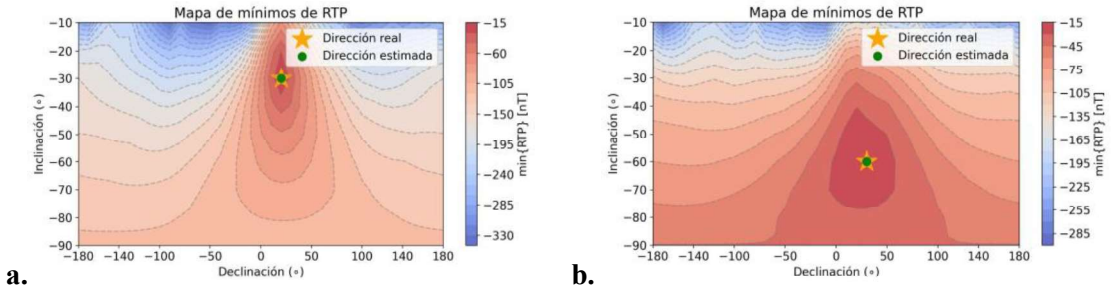


Figura 2. Resultados del método Max-Min. **a.** caso puramente inducido (I_m, D_m) = (−30°, +20°). **b.** caso remanente (I_m, D_m) = (−60°, +23°).

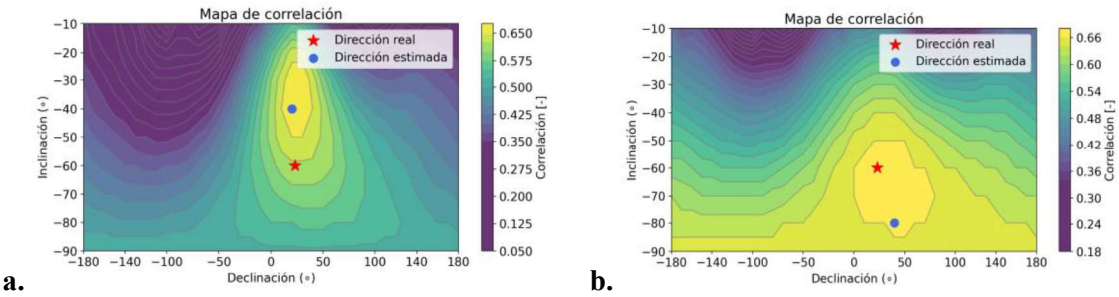


Figura 3. Resultados del método Max-Min. **a.** caso puramente inducido (I_m, D_m) = (−30°, +20°). **b.** caso remanente (I_m, D_m) = (−60°, +23°).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

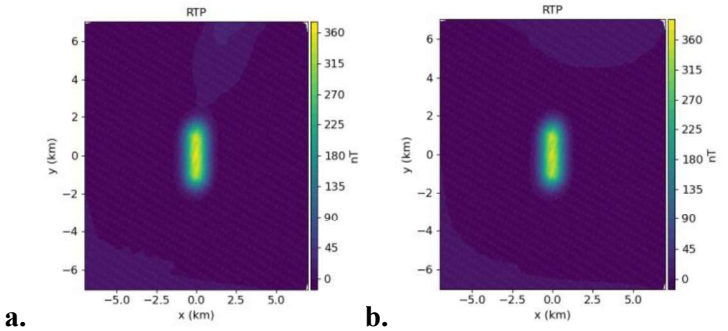


Figura 4. TFA modelada por NNLS luego de RTP. **a.** caso puramente inducido (I_m, D_m) = (−30.1°, +20.5°). **b.** caso remanente (I_m, D_m) = (−57.68°, +24.68°).

En la Figura 4 se muestran los resultados de la RTP calculada con los parámetros obtenidos del método NNLS considerando casos de magnetización inducida (a) y remanente (b), en los que se advierte simetría completa para ambos casos.

APLICACIÓN EN DATO REAL

En el estado de Goiás, región central de Brasil, se ha estudiado desde la década de 1960 que hay ocurrencia de rocas alcalinas del Cretácico a lo largo de un lineamiento NW-SE. Entre los principales complejos alcalinos en la porción norte del Goias alcaline province (GAP, por sus siglas en inglés) se encuentran los Montes Claros de Goiás, Diorama, Córrego dos Bois, Morro do Macaco y Fazenda Buriti. El GAP está formado por rocas máficas a ultramáficas que presentan una variedad de tipos petrográficos. Estas intrusiones alcalinas están rodeadas por un basamento precámbrico y las rocas sedimentarias fanerozoicas de la cuenca del Paraná. En 2004, esta región fue recorrida por un estudio aeromagnético a una altura aproximadamente constante de 100 m desde el terreno. Este levantamiento tiene un patrón de vuelo con líneas N–S espaciadas en 500 m y líneas de cruce E–W espaciadas desde 5000 m. A lo largo de cada línea, los datos están espaciados cada 8 m. Los datos fueron corregidos por variación diurna y se le ha restado el campo geomagnético modelado utilizando el campo magnético de referencia internacional (IGRF) evaluado en la época 2004.62, con declinación D_f=−18.5° e inclinación I_f=−19,5°. Esta región se caracteriza por intensas TFAs (Figura 5) con notables magnetizaciones remanentes que generalmente se asocian con las rocas de la línea alcalina del GAP (Dutra y Marangoni, 2009; Dutra et al., 2014).
En las Figuras 6 y 7 se muestran los resultados de los métodos Max-Min y COR y NNLS (a) y el campo RTP asociado a los parámetros estimados (b).

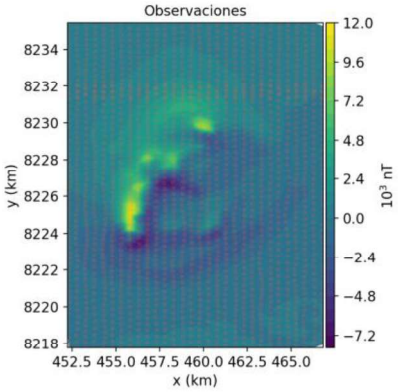
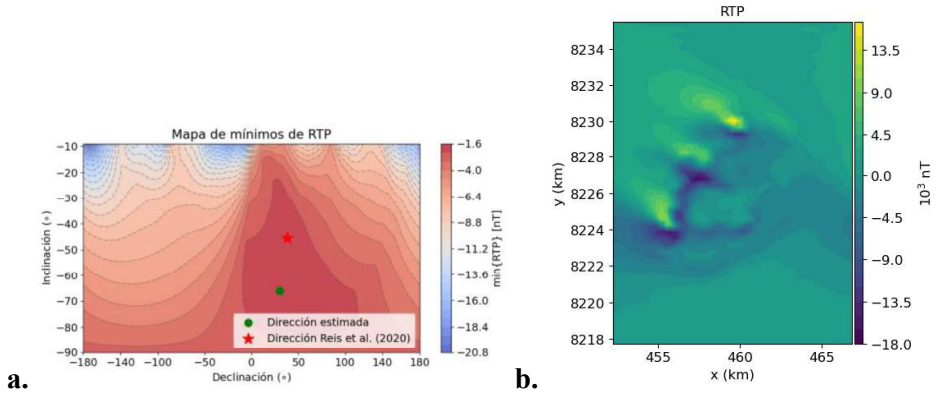


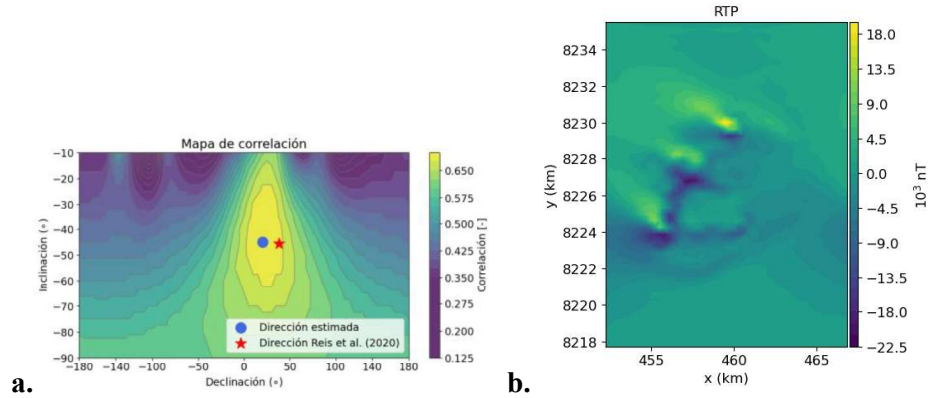
Figura 5. TFA en Montes Claros (BRA) (I_f, D_f) = (−19.5°, +18.5°), (I_m, D_m) = (−45.5°, +38.4°)(Reis et al., 2020).

 ISBN: 978-987-1323-89-0



a. **b.**

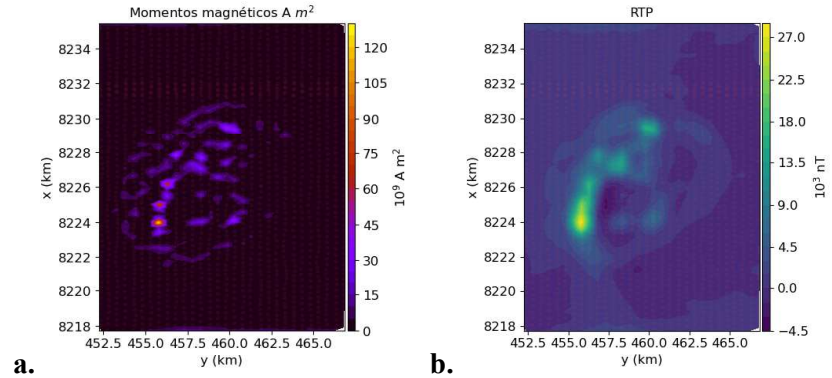
Figura 6. a. Mapa Max- Min. **b.** RTP asociada. TFA interpolada con el método de la capa equivalente.



a. **b.**

Figura 7. a. Mapa COR. **b.** RTP asociada. TFA interpolada con el método de la capa equivalente.

En la Figura 8 se muestra la distribución de momentos magnéticos que surgen como resultado del algoritmo NNLS. La distribución estimada de los momentos magnéticos sobre la EQL da lugar a una RTP con anomalías centradas en las fuentes, lo que indica una buena estimación de los parámetros D e I. Sin embargo Reis et al. (2020) muestran que NNLS en los mismos datos de Montes claros produjo grandes desajustes en algunas regiones aisladas que ellos señalan provienen de fuentes poco profundas y en las que no pueden inferirse información sobre la dirección de magnetización de las mismas.



a. **b.**

Figura 8. a. Momentos magnéticos invertidos por NNLS. **b.** RTP de la inversión por NNLS.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Tabla I. Resultados obtenidos de la dirección de magnetización en Montes Claros.

Método	I*[°]	D*[°]
Max-Min	-66	+30
COR	**-45**	**+20**
NNLS	-45.49	+38.4

En la Tabla I se presentan los valores numéricos obtenidos de los mejores estimadores de inclinación (I*) y declinación (D*) por los métodos Max-Min, COR y NNLS.

CONCLUSIONES

De los tres métodos para recuperar la dirección de magnetización explorados, Max-Min y COR son los más prácticos para programar, expeditivos y robustos. En cambio, NNLS es costoso computacionalmente, pero permite visualizar la distribución espacial de los momentos magnéticos invertidos.

Respecto a los ejemplos sintéticos, los tres métodos relevados arrojan resultados similares para la dirección de magnetización hallada con los parámetros I y D estimados.

En el caso del dato de campo de Montes Claros, observamos coherencia entre los resultados de Max-Min, COR y NNLS, encontrando ángulos en los mismos cuadrantes. Sin embargo, NNLS es el único en obtener un valor de la dirección de magnetización similar al publicado en un estudio anterior realizado de forma independiente en la misma zona. La comparación realizada en Montes Claros muestra que los tres métodos pueden ser una herramienta interesante para indicar la presencia de magnetización remanente y caracterizar la dirección de la misma en escenarios geológicos complejos.

En este trabajo hemos experimentado que utilizar Max-Min o COR para suministrar una dirección de magnetización inicial a NNLS acelera la convergencia. En particular, en Montes Claros, se requieren 23 iteraciones respecto a las 37 que demanda la dirección inicial sugerida en una publicación de referencia ($I_0 = -70°$, $D_0 = 50°$).

REFERENCIAS

Bhattacharyya, B. K. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization, *Geophysics*, 29(4), 517, doi: 10.1190/1.1439386 (1964).

Baranov, V. and Naudy, H. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole, *Geophysics*, 29:1, 67-79 (1964), doi: https://doi.org/10.1190/1.1439334.

Biegert, E. K. and P. S. Millegan. Beyon recon: The new world of gravity and magnetics. *The leading edge*, 17(1), 41-42 (1998).

Cooper, G. R. J. Gridding gravity data using an equivalent layer. *Computers & Geosciences*, 26(2), 227-233 (2000).

Dampney, C. N. G. The equivalent source technique. *Geophysics*, 34(1), 39-53(1969).

Dannemiller, N. y Li, Y. A new method for determination of magnetization direction, *Geophysics*, 71(6), L69-L73 (2006), DOI: 10.1190/1.2356116.

Dutra, A. C., Y. Marangoni, and R. I. F. Trindade, Aeromagnetic and physical-chemical properties of some complexes from Goiás Alkaline Province: *Brazilian Journal of Geology*, 44, 361–373, doi: 10.5327/ Z2317-4889201400030003 (2014).

Dutra A.C., Marangoni Y. R. Gravity and magnetic 3-D inversion of Morro do Engenho complex, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 28(2):193-203 (2009).

Emilia, D. A., and R. L. Massey. Magnetization estimation for nonuniformly magnetized seamounts: *Geophysics*, 39, 223–231(1974), doi: 10 .1190/1.1440423.

Fedi, M., Florio, G. y Rapolla, A. A method to estimate the total magnetization direction from a distortion analysis of magnetic anomalies, *Geophysical Prospecting*, 42(3), 261-274 (1994).

Haney, M. and Y. Li. Total, magnetization direction and dip from multiscale edges: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 735–738 (2002).

Keating, P. and Zerbo, L. 1996, An improved technique for reduction to the pole at low latitudes, *Geophysics*, 61(1), 131-137 (1996), doi: http://dx.doi.org/10.1190/1.1439334.

Li, Y. and D. W. Oldenburg. Rapid construction of equivalent sources using wavelets: Geophysics, 75(3), L51–L59 (2010), doi: 10.1190/1.3378764.

Liu, S., X. Hu, Y. Xi, T. Liu, and S. Xu. 2D sequential inversion of total magnitude and total magnetic anomaly data affected by remanent magnetization: *Geophysics*, 80(3), K1–K12 (2015), doi: 10.1190/geo2014- 0019.1.

Liu, YX., Li, WY., Ma, GQ. *et al.* Oil and gas basin analysis based on airborne gravity and magnetic data. *Appl. Geophys.* (2022). https://doi.org/10.1007/s11770-022-0970-2.

Nabighian, M. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation: *Geophysics*, 37, 507–517 (1972).

Nabighian, M.N., V.J.S. Grauch, R.O. Hansen, T.R. LaFehr, Y. Li, J.W. Peirce, J.D. Phillips and M.E. Ruder. The historical development of the magnetic method in exploration: *Geophysics*, 70, 33ND-61ND (2005), doi: 10.1190/1.2133784.

Pedersen, L. B. Relations between potential fields and some equivalent sources: *Geophysics*, 56, 961–971 (1991), doi: 10.1190/1.14

Ribeiro-Filho, N., R. Bijani, and C. Ponte-Neto. Improving the cross-correlation method to estimate the total magnetization direction vector of isolated sources: A space-domain approach for unstable inclination values: *Geophysics*, 85(4), J59–J70 (2020), doi: 10.1190/geo2019-0008.1.

Reis, A. L. A., Oliveira Jr., V. C. y Barbosa, V. C. F. Generalized positivity constraint on magnetic equivalent layers, *Geophysics*, 85, J99-J110 (2020).

Roest, W. and M. Pilkington. Identifying remnant magnetization effects in magnetic data: *Geophysics*, 58, 653–659 (1993).

Silva, J. B. C., S. S. Vasconcelos, and V. C. F. Barbosa. Apparent Magnetization mapping using entropic regularization: *Geophysics*, 75, no. 2, L39–L50 (2010), doi: 10.1190/1.3358160.

Vatankhah, S., S. Liu, R.A. Renaut, X. Hu, J.D. Hogue and M. Gharloghi. An Efficient Alternating Algorithm for the Lp-Norm Cross-Gradient Joint Inversion of Gravity and Magnetic Data Using the 2-D Fast Fourier Transform: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-16 (2022), doi: 10.1109/TGRS.2020.3033043.

Wang, L., Liu, Shuang, Zuo, B., Hu Xiangyun. Improved MAX-MIN method to estimate total magnetization direction using Wiener filtering, *Geophysics*, 87(6), B313-V570, DOI: 10.1190/geo2022-0101.1 (2006).

PROSPECCIÓN ARQUEOGEOFÍSICA EN BALCARCE, PCIA. DE BUENOS AIRES

Vivian Grünhut[a], M. Victoria Bongiovanni[a], Patricia Martinelli[b], Fernando Oliva[c] y Matías De La Vega[b]

[a]*Facultad de Ingeniería – Universidad Austral, LIDTUA (CIC)-CONICET, ARGENTINA*
[b]*Grupo de Geofísica Aplicada y Ambiental (GAIA) – Departamento de Física, FCEN, UBA e IFIBA-CONICET, ARGENTINA*
[c]*Centro de Estudios Arqueológicos Regionales, FHYA, Universidad Nacional de Rosario, ARGENTINA*

email: vgrunhut@austral.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue realizar prospecciones geofísicas alrededor del monumento a la República. Este monumento se encuentra ubicado en el centro de la Plaza Libertad en la ciudad de Balcarce, Provincia de Buenos Aires. En este lugar se encontraba ubicada una construcción del año 1936, obra del arquitecto Francisco Salamone, la cual fue demolida en 1945. Actualmente se quiere reconstruir la misma y, para preservar posibles restos del edificio original que aún permanezcan enterrados, es necesario un trabajo previo de investigación arqueológica. Cabe remarcar que el edificio original es considerado monumento histórico nacional. El objetivo de nuestro trabajo fue estudiar la posibilidad de localizar principalmente los fundamentos de la obra original, para su posterior excavación por parte de la comunidad arqueológica. La campaña geofísica se realizó del 3 al 5 de septiembre de 2021 donde se aplicó el método de prospección geoeléctrica. Producto de estas prospecciones se localizaron algunas anomalías. La localización de las mismas posibilitó un plan de excavación, el cual fue completado con el fin contrastar las hipótesis surgidas de las prospecciones geoeléctricas. La correlación existente entre las anomalías detectadas y lo hallado mediante la excavación, permitieron valorar el trabajo interdisciplinario arqueogeofísico.

Palabras Clave: Geoeléctrica, Balcarce, Arqueogeofísica.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una rama interdisciplinaria, la Prospección Arqueológica, cuyo objetivo principal es la resolución de problemas arqueológicos utilizando métodos físicos y químicos. Algunas ventajas de estas técnicas es que son no-invasivas y no perturban el sitio. De esta forma, los arqueólogos pueden priorizar áreas de excavación a partir de los mapas que se pueden obtener de una prospección geofísica. Estos estudios también pueden indicar la presencia de materiales enterrados, restos de paredes, túneles, basamentos, etc.

Un problema no trivial en la arqueología es definir dónde excavar. Cuando se conoce un sitio, (ya sea por exposición o por datos previos) es conveniente tener un mapa del subsuelo con la descripción de las estructuras a desenterrar, poder estimar el grado de conservación y hasta saber si puede haber o no material arqueológico. Estos datos pueden definir si se hace o no una excavación o hasta qué punto vale la pena exponer una estructura. Si bien los arqueólogos pueden utilizar distintas fuentes para localizar un sitio, y de hecho hay muchos ejemplos exitosos en este sentido, tener el punto exacto no solo ahorra tiempo, sino que además se pueden evitar posibles daños que pudiesen ocurrir si no se sabe cómo es lo que se está buscando.

Una prospección geofísica consiste en un conjunto de mediciones, usualmente siguiendo una grilla regular, realizadas sobre la superficie de la tierra -o alternativamente en mar, aire o en un pozo. Se tiene una fuente de energía -natural o artificial- que genera algún tipo de perturbación, por ejemplo, un pulso eléctrico o un microsismo. Esta perturbación, cuando se transmite en la tierra, resulta afectada por las propiedades físicas del subsuelo. La respuesta que produce la tierra es recibida por un sensor adecuado que almacena dicha información. Un análisis detallado de los datos permite la caracterización del subsuelo y la detección de discontinuidades, es decir, detecta qué sectores de un espacio analizado difieren significativamente de otros en alguna propiedad. A partir de la detección de variaciones o **anomalías** de estas propiedades se pueden identificar los distintos constituyentes del suelo, así como detectar cuerpos o estructuras enterradas.

En el presente trabajo se utilizó el método de prospección eléctrica llamado Geoeléctrica, en el cual los materiales se caracterizan a partir de su resistividad eléctrica. Se pueden obtener tomografías 2D del subsuelo, a partir de mediciones realizadas en superficie. Este método es no invasivo y no destructivo y, por lo tanto, tiene amplias aplicaciones en temas ambientales como, por ejemplo, en detección de estructuras arqueológicas enterradas (Osella et al, 2015; Akca et al 2019), caracterización y monitoreo de contaminantes (Coria et al, 2009; Abudeif et al, 2022), etc.

Se viene aplicando en Arqueología desde hace algunas décadas. Se van a dar los lineamientos generales del método, a fin de facilitar la interpretación posterior de los resultados obtenidos.

MÉTODO GEOELÉCTRICO

Mediante el método geoeléctrico se busca obtener una imagen del subsuelo en términos de la distribución de resistividades eléctricas. Esta imagen muestra las variaciones de la resistividad de la corteza tanto laterales como en profundidad, lo que permite detectar y caracterizar cuerpos o estructuras cuya resistividad difiera de las del medio circundante. Para obtener dicha imagen se emplea una fuente artificial de corriente mediante la cual se inyecta corriente de intensidad I a través de un par de electrodos A y B y se realizan mediciones de la diferencia de potencial (ΔV) en otros dos electrodos M y N -sensores- (ver Fig. 1) cuyas posiciones se eligen convenientemente. Midiendo la intensidad de corriente inyectada en el suelo, la diferencia de potencial y las distancias relativas entre los electrodos, se obtienen los datos de campo a partir de los cuales se calcula la distribución de resistividades subsuperficiales. De esta forma, se obtiene información del subsuelo con mediciones realizadas solamente en superficie, por lo cual esta técnica de prospección resulta no destructiva y no invasiva.

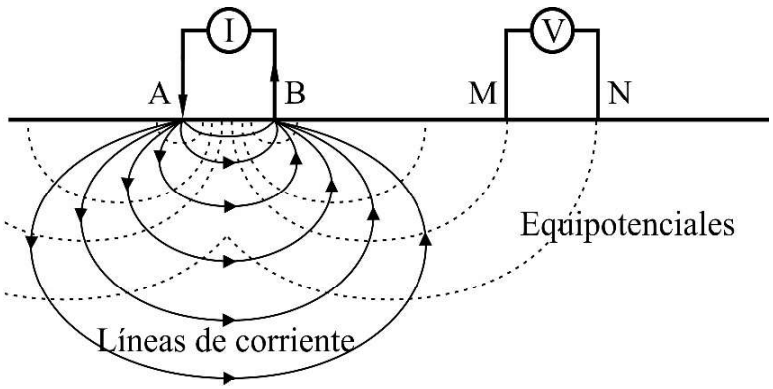


Figura 1. Dispositivo utilizado en la prospección geoeléctrica

Cada configuración de electrodos posee su propia sensibilidad y resolución según las distancias entre electrodos utilizados y el modo en que se implemente. Según las dimensiones y/o profundidades de los rasgos o estructuras que se desea encontrar y de sus contrastes de resistividad se debe elegir la configuración adecuada y el modo conveniente de implementarla. Para el caso de interés en este trabajo, que requiere alta resolución espacial y profundidades someras, los mapeos laterales resistivos Dipolo-Dipolo son las técnicas de prospección más adecuadas. Para llevar a cabo un sondeo lateral con esta configuración primero se define la línea o perfil de interés la cual presentará una dada longitud. Luego se colocan los electrodos consecutivos al comienzo de la línea de manera tal que se encuentren separados a distancias iguales (*a*) siendo el punto de sondeo el punto medio entre los electrodos B y M (ver Fig. 2.I). Una vez tomada la medición de resistividad aparente, dejando los electrodos de corriente fijos, se mueven los de potencial una distancia *a* cada uno, quedando así los electrodos B y M distanciados en 2*a*, con lo que el punto de sondeo se corrió una distancia *a/2* (ver Fig. 2.II). Este procedimiento se repite un número n de veces con lo cual el punto de sondeo se desplaza lateralmente hasta una distancia *na/2*. En general el *n* máximo puede alcanzar valores entre 6 y 9 dependiendo de la profundidad deseada para la prospección. Una vez terminada la serie de mediciones descripta, se mueven los electrodos de corriente cada uno una distancia *a* (ver Fig. 2.III) y se repite el mismo procedimiento hasta el final de la línea (ver Fig. 2.IV). Se dice que se realizó un sondeo utilizando la configuración Dipolo-Dipolo con aberturas electródicas *a*.

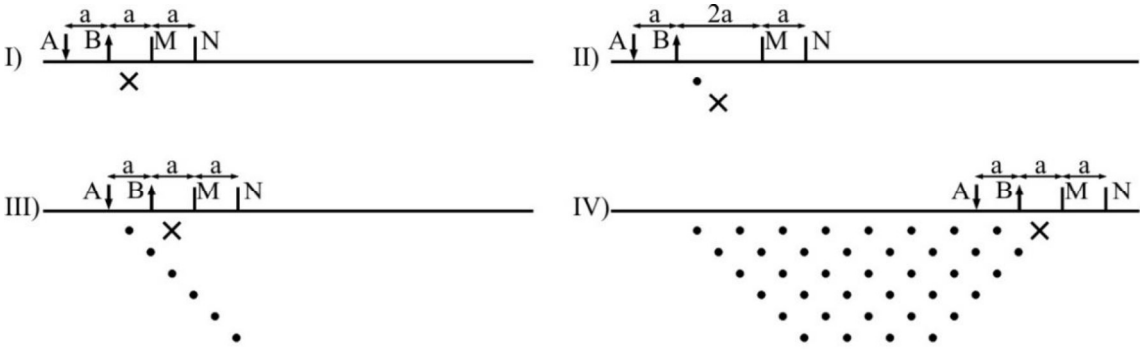


Figura 2. Esquema de la secuencia de medición al realizar un mapeo lateral utilizando la configuración electródica Dipolo-Dipolo. X indica el punto de sondeo en la configuración indicada y los círculos, los puntos de sondeos previamente registrados.

De esta forma se produce un mapeo en profundidad -alejando los electrodos B y M- al mismo tiempo que se produce un mapeo lateral -desplazándose el punto de sondeo. Con los valores de corriente inyectada y diferencia de potencial medidos en cada punto y un factor geométrico que depende de la ubicación de los electrodos, se obtiene un dato, llamado resistividad aparente (que depende de la resistividad real del medio). Los valores obtenidos para la resistividad aparente en cada medición se grafican en lo que se conoce como una pseudosección. Cada valor obtenido en una dada medición se grafica en un plano (ver Fig. 2.IV) y se lo ubica según la posición del punto de sondeo en la dirección horizontal y a una profundidad *na/2* en la dirección vertical. Generalmente se le asigna a cada valor de resistividad aparente obtenido un color, azul para los materiales más conductores y rojo para los más resistivos.

A partir de la visualización de los datos se pueden ya inferir la existencia de anomalías. Sin embargo para una correcta caracterización, los datos deben ser procesados. Se utilizan

para ello métodos de inversión, que consisten en códigos que permiten, a partir de la respuesta que originó la tierra frente a un estímulo (en este caso la inyección de corriente) obtener las características del medio, es decir, la distribución real de resistividades. Este mapa en profundidad de la resistividad eléctrica se denomina Tomografía Eléctrica.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El trabajo de campo se realizó entre los días 3 y 5 de septiembre de 2021. Se estudió la zona alrededor del Monumento a la República, en el centro de la Plaza Libertad. El edificio que se propone reconstruir, es el que estaba alrededor de la pirámide; una estructura circular de 15 m de diámetro y 3.5 m de altura como el original, que se muestra en la Fig. 3. En la Fig. 4 se muestra una imagen satelital actual de la plaza, con la ubicación del Monumento en su centro.



Figura 3. Foto de la construcción original.



Figura 4. Imagen satelital de la zona en la actualidad.

Se desconoce actualmente la ubicación y el estado de conservación de los fundamentos, los cuales se desean conservar al menos en parte, para su posterior resguardo como parte del Patrimonio Arqueológico Nacional. Era de esperar que los fundamentos originales fueran vigas de hormigón armado ubicadas alrededor del Monumento. Dada la simetría axial del edificio, cabía la posibilidad de que tuviera la forma de una "corona circular" alrededor del eje central. Es por eso que se realizaron líneas de prospección axiales, de manera tal de poder intersecar a la posible viga enterrada. Se utilizó la configuración electródica Dipolo-Dipolo. En la fig. 5 se muestra la ubicación de las líneas prospectadas, cuyas longitudes variaron de 7.5 m a 9,5 m de largo. La línea 1 está emplazada a lo largo de la dirección Noroeste, y la línea 2 a lo largo de la dirección Sureste. Luego la línea 4 se realizó paralela al camino, y las demás se ubicaron de manera tal de completar el sector comprendido entre el Noreste y el Suroeste. En la Fig. 5 también se indica la ubicación de estas líneas con respecto al octógono que circunda la zona de césped.

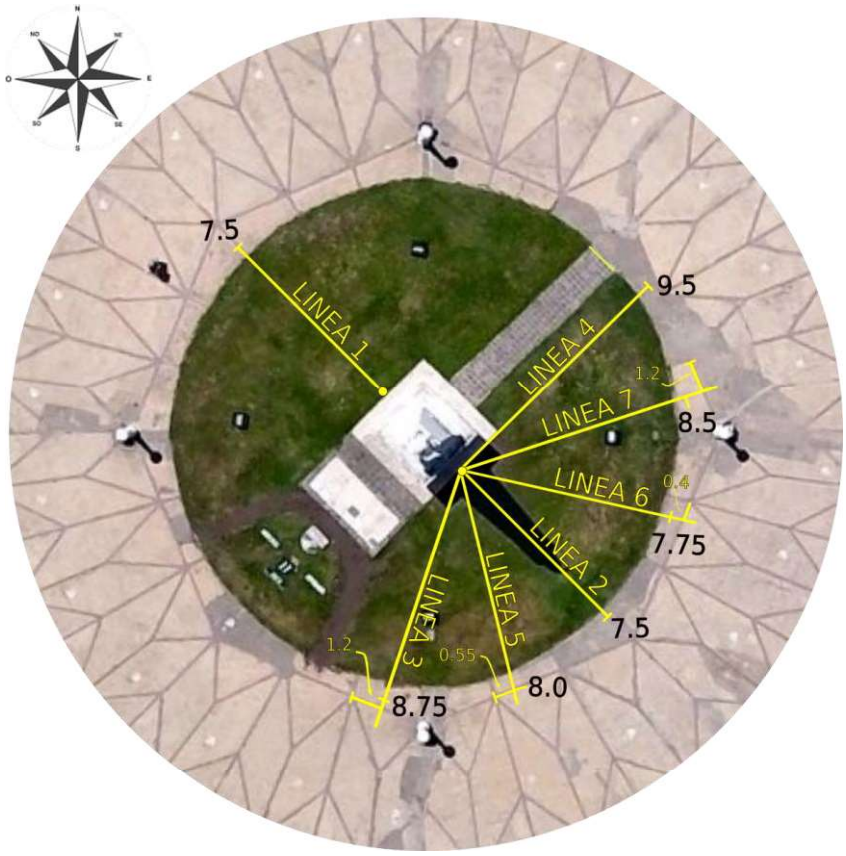


Figura 5. Vista aérea superior de la zona prospectada, con la ubicación de las líneas de geoeléctrica indicada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los perfiles de resistividad eléctrica del suelo obtenidas en las líneas L1 a L7 se muestran en la Fig. 6. Se han realizado diversas inversiones de los datos para tener mayor certeza de la existencia de las anomalías que se ven. Se observó que hay una cierta variación en

los resultados según como se invierta, pero lo que consideramos de interés aparece prácticamente en todas las inversiones. Este hecho justamente es lo que nos da certeza acerca de la existencia de algunas anomalías.
En la L1 se observa una anomalía resistiva (zona roja) extendida desde 2.5 m hasta los 3.5 m, a una profundidad media de 65 cm. Luego de obtener resultados preliminares en esta línea, se realizó una excavación en la que se encontró una estructura de 1 m de largo y a la profundidad indicada, aunque ligeramente desplazada hacia la derecha con respecto a la anomalía detectada. En la Fig. 7 se muestra una foto de la excavación con la estructura desenterrada.

En la línea L2, que se encuentra simétricamente ubicada respecto de la L1, se pudo detectar la presencia de otra anomalía resistiva, que se extiende desde los 4.25 m hasta los 5 m. Asimismo, hay otra zona con menor contraste hacia la izquierda, desde los 3 m hasta los 4.25 m. La zona central podría corresponderse con material similar al encontrado en la L1, y las zonas de alrededor podrían corresponder a material de relleno. La profundidad media a la que se encuentra es de 65 cm, coincidente con la anomalía marcada en la L1.

En la Línea 3 se distingue una anomalía conductora (zona marrón) a los 5.75 m, a una profundidad de 50 cm. Esta anomalía no es del mismo tipo que las de las líneas anteriores, pero su presencia es clara y localizada.

En la Línea 4, que es la paralela al camino, no se ve ninguna zona anómala.

En la Línea 5 se distingue una anomalía resistiva localizada centrada en los 6.3 m, a 40 cm de profundidad, y otra anomalía resistiva extendida y superficial, desde 2 m a 2.5 m aproximadamente.

En la Línea 6 también se distingue una anomalía resistiva extendida de similares características que en la L5; desde los 2.25 m hasta los 3 m aproximadamente.

En la Línea 7 se distinguen tres zonas anómalas resistivas. Una ubicada a los 2.25 m y a 50 cm de profundidad, otra extendida y superficial desde los 3 a los 5 m, y otra puntual y superficial cerca de los 6 m.

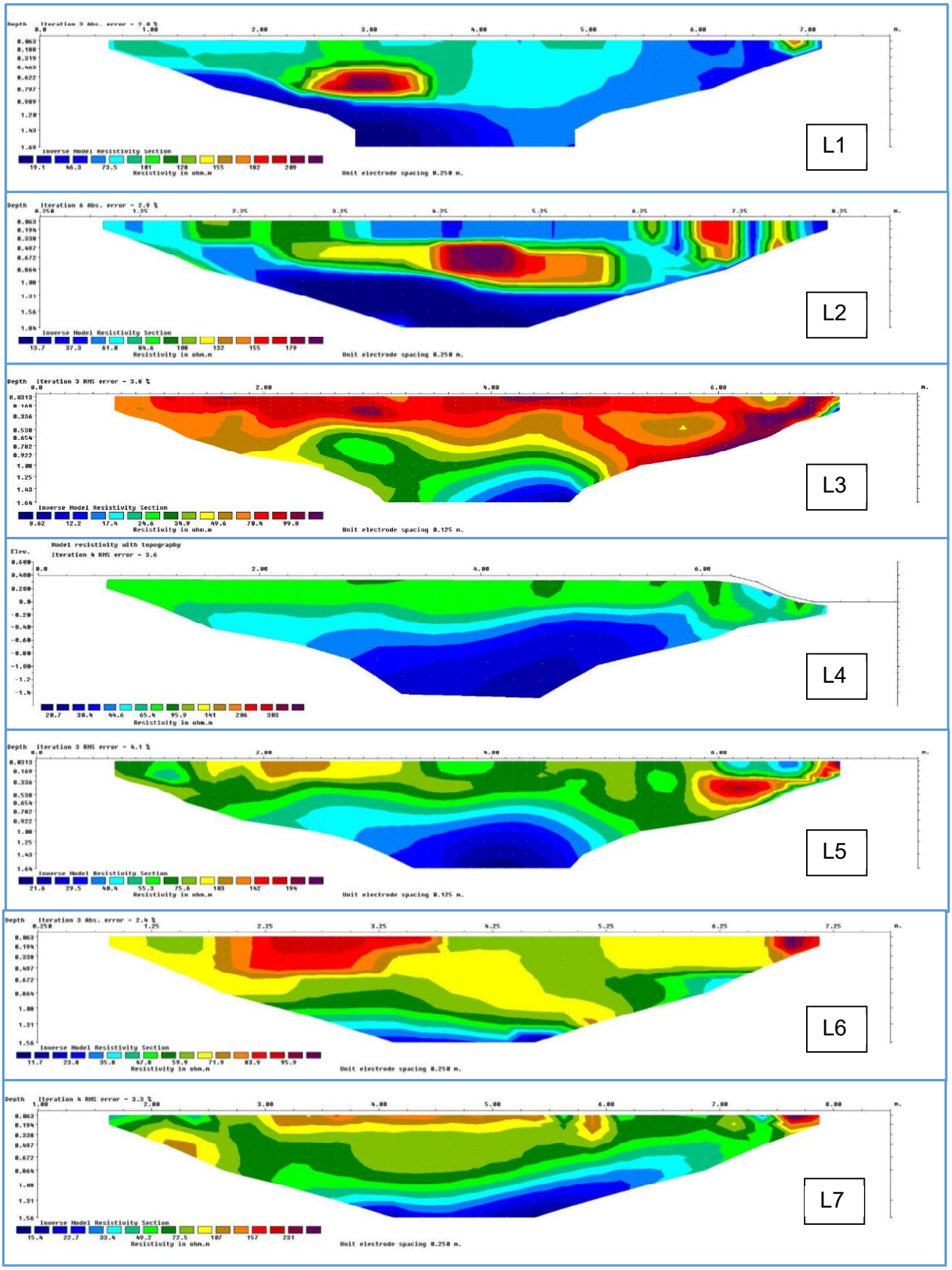


Figura 6. Tomografías eléctricas de las líneas L1 a L7.

Cabe destacar que en todos los perfiles se observa una anomalía resistiva puntual al final de la línea, que no se corresponde con una estructura de interés, sino que se asocia con la impedancia de contacto generada por los electrodos que debieron ser enterrados perforando el cemento. También se observa en todos los casos una zona conductora (azul) extendida en la zona inferior, que se correspondería con el suelo natural. Promediando todas las líneas este se encontraría a partir del metro de profundidad.



Figura 7. Estructura hallada en la excavación, que se corresponde con la anomalía detectada en la línea L1.

En la Fig. 8 se muestra un mapa con las anomalías analizadas previamente. Para mayor claridad, se clasificaron en tres tipos, diferenciándose con colores. Las de tipo A son las de color rojo, indican las anomalías resistivas y profundas. Las de tipo B son las de color magenta, que indican las anomalías resistivas superficiales. La de tipo C identifica la anomalía conductora.

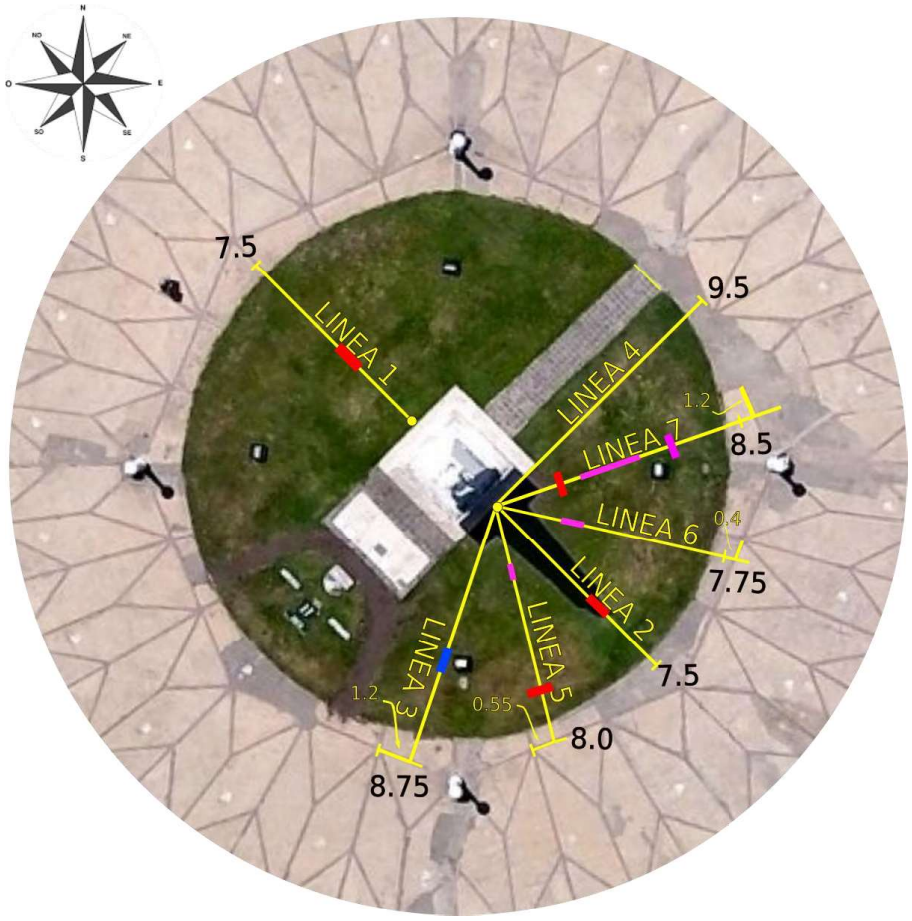


Figura 8. Mapa de anomalías.

CONCLUSIONES

Hay que tener en cuenta que los métodos geofísicos determinan contrastes en las propiedades físicas, pero los valores encontrados no definen unívocamente el tipo de material que los produce. Es por ello que para una interpretación rigurosa siempre es necesario contar con datos de algún pozo en la zona, a fin de poder calibrar los resultados obtenidos.

En este caso, la localización de las anomalías posibilitó un plan de excavación no finalizado aún. Hasta el momento, se ha hallado la estructura que se muestra en la Fig. 7 correlacionada con la anomalía detectada en L1. La correlación existente entre la anomalía detectada y lo hallado mediante la excavación, permitieron además valorar el trabajo interdisciplinario arqueogeofísico.

REFERENCIAS

Abudeif, A.M.; Abdel Aal, G.Z.; Masoud, A.M.; Mohammed, M.A. Detection of Groundwater Pathways to Monitor Their Level Rise in Osirion at Abydos Archaeological Site for Reducing Deterioration Hazards, Sohag, Egypt Using Electrical Resistivity Tomography Technique. *Appl. Sci.*, 12, 10417 (2022).

Akca, İ., Balkaya, Ç., Pülz, A., Alanyalı, H. and Kaya, M. Integrated geophysical investigations to reconstruct the archaeological features in the episcopal district of Side (Antalya, Southern Turkey), *Journal of Applied Geophysics*, Volume 163, Pages 22-30 (2019).

Coria, D., Bongiovanni, V., Bonomo, N., de la Vega, M, Garea, M.T. and Osella, A. Hydrocarbon contaminated soil: geophysical-chemical methods for designing remediation and monitoring strategies. *Near Surface Geophysics*, Vol 7, No. 3, pp. 227-236 (2009).

Osella, A. y Lanata, J.L. Arqueo-geofísica: Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado. *Fundación de Historia Natural Félix de Azara y Universidad Maimónides*, ISBN-10: 987-05-1848-8, ISBN-13: 978-987-05-1847-1, (2006).

Osella, A., Martinelli, P., Grünhut, V., de la Vega, M., Bonomo, N. y Weissel, M. Electrical imaging for localizing historical tunnels at an urban environment, *J. Geophys. Eng*. 12 674–685 (2015).

EXTREMOS COMPUESTOS CÁLIDOS Y SECOS DE VERANO EN DISTINTAS REGIONES DE ARGENTINA Y SU MODULACIÓN POR EL ENSO

Agustina Lopez Ramirez[a], Mariana Barrucand[ab], Soledad Collazo[a]

[a]*Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, ARGENTINA.*

e-mail: alopez@at.fcen.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se propone caracterizar la ocurrencia conjunta de extremos cálidos y secos durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero) en Argentina, al norte de 40°S, y analizar la modulación ejercida por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) a partir de un modelo de regresión logística. Se estudió la ocurrencia simultánea de meses cálidos y meses secos utilizando un umbral basado en percentiles para definir los extremos de temperatura y de precipitación. El análisis fue realizado considerando las observaciones de 52 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la base de datos Climate Research Unit gridded Time Series (CRU) y el reanálisis ERA5 para el período 1979-2018. Los resultados muestran que los meses cálidos y secos simultáneos fueron más frecuentes en el Centro y Noreste Argentino. En términos generales, CRU evidencia una buena correspondencia con las observaciones, mientras que ERA5 muestra una tendencia a la sobreestimación del número total de eventos en gran parte de la región bajo estudio. El análisis de la modulación ejercida por el ENSO (caracterizado a partir del índice ONI) reveló que, las condiciones generadas durante La Niña favorecen la ocurrencia de meses cálidos y secos en toda la región de análisis, con excepción del Noroeste Argentino donde la ocurrencia se vio favorecida por las condiciones generadas durante El Niño. Las regresiones logísticas permitieron modelar y cuantificar esta modulación y demostraron que el ENSO cumple un rol significativo como forzante de la ocurrencia de eventos compuestos cálidos y secos en la región central, Cuyo, Noreste Argentino y en parte de la Región Pampeana.

Palabras Clave: Regresión Logística, Eventos Compuestos, ONI, El Niño, La Niña.

INTRODUCCIÓN

La concurrencia de un extremo cálido y un extremo seco es uno de los tipos de eventos compuestos más relevantes en vista de sus impactos asociados. Los efectos adversos sobre la agricultura, la provisión de energía, la disponibilidad de agua, la seguridad alimentaria y la salud forman parte de una larga lista de consecuencias asociadas a la ocurrencia de este tipo de eventos (Raymond et al., 2020). Incluso, son capaces de afectar el crecimiento y desarrollo de cultivos, aumentar la mortalidad de árboles y hasta pueden favorecer la aparición de incendios (Jiang and Huang, 2000; Allen et al., 2010; Flannigan et al., 2009). Teniendo en cuenta los riesgos e impactos amplificados, es esencial estudiar los mecanismos que conducen a este tipo de eventos para la alerta temprana de posibles efectos adversos.

Hasta el momento, se han estudiado ampliamente los eventos de temperaturas y precipitaciones extremas en forma individual (Rusticucci and Barrucand, 2004; Barrucand et al., 2008; Robledo and Penalba, 2008; Penalba and Robledo 2010, Rivera

et al., 2013; Llano and Penalba, 2011; Rusticucci et al., 2017; Olmo and Betolli, 2021); sin embargo, aún son pocos los estudios sobre la concurrencia de los extremos de estas dos variables. En el sur de Sudamérica, la temperatura y la precipitación se encuentran inversamente relacionadas durante la estación cálida en gran parte de la región. Estudios previos demuestran que los veranos cálidos tienden a presentar bajas precipitaciones, mientras que los veranos fríos se asocian a precipitaciones superiores a lo normal (Rusticucci and Penalba, 2000). Consistentemente, Barrucand et al. (2014) estudió el vínculo entre la temperatura mensual y los déficits de precipitación en tres estaciones meteorológicas representativas de las regiones noreste, centro y centro este de la Argentina y sugiere que los meses cálidos y secos son significativamente más frecuentes que los meses fríos y secos durante la estación cálida (octubre a marzo) .

Los déficits de humedad superficial también pueden ser un factor relevante para la ocurrencia de extremos cálidos en muchas regiones del mundo (Durre et al., 2000; Fischer and Seneviratne, 2007; Seneviratne et al., 2010; Hirschi et al., 2011; Alexander, 2011). La escasez de precipitaciones en Europa, Australia, China y América del Norte y del Sur están asociadas a la posterior aparición de extremos cálidos. En Sudamérica, la probabilidad de ocurrencia de un número de días calurosos superior a la media puede aumentar hasta un 70% luego de un déficit de precipitaciones, mientras que decae a un 30-40% luego de condiciones húmedas (Mueller and Seneviratne, 2012). Asimismo, estudios más recientes demostraron que los déficits de precipitación prolongados pueden considerarse como uno de los principales predictores de la frecuencia de días cálidos en verano en el centro-norte de Argentina (Collazo et al., 2019). Todo esto deja en evidencia el vínculo entre estos dos eventos extremos y la necesidad de desarrollar una caracterización integral de su concurrencia que incluya su variabilidad, posibles factores forzantes y mecanismos involucrados.

Además de la interacción entre el suelo y la atmósfera, patrones de teleconexión o la persistencia de circulaciones anómalas pueden favorecer la ocurrencia de eventos compuestos. Las oscilaciones de gran escala, como el fenómeno del ENSO, pueden influenciar significativamente la ocurrencia de eventos cálidos y secos. Mukherjee et al. (2020) analizó la ocurrencia conjunta de olas de calor y sequías y su relación con el ENSO, la Oscilación del Pacifico Norte (PDO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y demostró que el ENSO es el modo de variabilidad predominante sobre la ocurrencia eventos en el hemisferio sur. En particular, la fase La Niña posee una influencia significativa en la ocurrencia conjunta de olas de calor y sequías en el sur de Sudamérica.

Esta asociación entre el ENSO y los eventos cálidos y secos en Sudamérica es consistente con otros estudios realizados previamente. Por ejemplo, Hao et al. (2018) sugieren que el ENSO desempeña un rol fundamental en la ocurrencia de eventos compuestos cálidos y secos durante el verano en regiones tropicales como el norte de Sudamérica. Durante los eventos El Niño, la rama descendente de la celda de Walker se ubica sobre el norte de Sudamérica lo cual inhibe las precipitaciones en la región. En estos casos, la probabilidad de ocurrencia de un evento cálido y seco aumenta en un 82%, mientras que, durante los eventos La Niña, la probabilidad decae en un 46% (Feng and Hao, 2021).

Debido a la relevancia del impacto negativo y la necesidad de una mejor comprensión de los extremos climáticos compuestos en la región, este trabajo tiene como objetivos caracterizar la ocurrencia conjunta de meses cálidos y meses secos durante el verano en Argentina, al norte de 40°S, y analizar la modulación ejercida por las condiciones simultáneas (verano) y previas (primavera) del fenómeno del ENSO sobre la ocurrencia de eventos compuestos. Para ello, se utilizan distintas bases de datos en el periodo 1979-2018 y se aplican técnicas como la regresión logística.

MÉTODOS

Se dispuso de los datos mensuales de temperatura máxima y precipitación acumulada de noviembre, diciembre, enero y febrero dentro del periodo 1979-2018 de tres bases de datos diferentes. La primera base de datos estuvo conformada por las observaciones de 52 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional situadas en Argentina, al norte de 40ºS. La segunda base de datos utilizada fue Climatic Research Unit gridded Time Series (CRU TS) en su 4ta versión. CRU TS es una base de datos grillada ampliamente utilizada para estudios climáticos que se deriva a partir de la información recolectada por una red extensa de estaciones meteorológicas y que luego es interpolada a una retícula de 0,5° x 0,5°(Harris et al., 2020). Por último, la tercera base de datos consultada fue el reanálisis ERA5 en una retícula de 0,5° x 0,5°. ERA5 es la 5ta generación de reanálisis elaborado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts que incluye mejoras en la resolución temporal y espacial en comparación con otros reanalisis previos (Hersbach et al., 2020). Las especificaciones sobre la construcción de la base de datos CRU TS y el reanálisis ERA5 se puede encontrar en la bibliografía citada.

Para caracterizar al ENSO se consideraron los valores del índice Oceanic Niño Index (ONI) del trimestre diciembre-enero-febrero (DEF) a fin de representar la oscilación durante el verano. Además, se dispuso de los valores del índice ONI del trimestre septiembre-octubre-noviembre (SON) con el fin de evaluar la atribución de las condiciones previas del ENSO sobre la ocurrencia de los eventos durante el verano austral. El índice ONI se basa en el promedio móvil de tres meses de las anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 12°W-170°W). Los episodios El Niño están definidos por al menos 5 trimestres consecutivos donde el índice ONI es superior a 0,5°C, mientras que los episodios La Niña están dados por al menos 5 trimestres consecutivos donde el índice ONI es menor a -0,5°C. Los valores del índice se obtuvieron de la página del Climate Prediction Center (CPC) de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

Los eventos extremos pueden definirse cuantitativamente a partir de su probabilidad de ocurrencia o a partir de un umbral específico. En este trabajo se establecieron umbrales basados en percentiles para determinar los eventos compuestos. A partir de los datos mensuales de temperatura máxima y precipitación, se definieron los meses cálidos como aquellos meses con temperatura máxima superior al percentil 80 de su distribución empírica y como meses secos aquellos que no superen el percentil 20 de la distribución empírica de precipitación. En base a esto, un evento compuesto cálido y seco estará dado por la ocurrencia simultánea de un mes cálido y un mes seco.

Los modelos de regresión lineal comúnmente utilizados para estudiar la respuesta de una variable numérica a partir de una o más variables predictoras muestra ciertas limitaciones cuando la variable a modelar posee una respuesta binaria. Una solución posible a estas limitaciones es aplicar un modelo de regresión logística (Wilks, 2011). Esta metodología es análoga a los modelos de regresión lineal pero se encuentra adaptada para modelos en los que la variable dependiente es dicotómica. En estos casos, la respuesta binaria de la variable es representada en términos de su probabilidad, permitiendo evaluar el efecto de la variable continua independiente sobre la probabilidad de ocurrencia de un evento. Además, los coeficientes que acompañan al modelo son capaces de brindar información sobre la relación que pueden presentar las variables. Teniendo en cuenta que los eventos compuestos pueden ser expresados en términos de una variable dicotómica (ocurrencia o

no ocurrencia), el modelo de regresión logística se convierte en una herramienta útil para analizar y representar la relación entre los meses cálidos y secos y el fenómeno del ENSO.

Para construir los modelos de regresión logística se consideró el índice ONI como variable predictora X para representar el ENSO y se definió una variable binaria Y para representar la ocurrencia de al menos un mes con evento compuesto por verano (Y=1) o la no ocurrencia (Y=0). De esta forma, la relación entre dichas variables está dada por la ecuación del modelo de regresión logística:

$$\ln\left(\frac{p(x)}{1-p(x)}\right) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (1)$$

donde p(x) es la probabilidad de ocurrencia de un evento compuesto dada por el índice ONI. β_0 y β_1 son coeficientes que acompañan y dan forma a la curva del modelo. La significancia estadística de la regresión fue testeada mediante un test de Wald para la pendiente β_1 (Moore et al., 2009). Al término *p(x)/1-p(x)* de la Ec. (1) se lo denomina *odd* y es la probabilidad de ocurrencia sobre la probabilidad de no ocurrencia, es decir, la probabilidad condicional. A partir de este término se puede derivar una expresión que evalúa el efecto del índice ONI sobre la probabilidad de ocurrencia de un extremo compuesto. Esta expresión lleva el nombre de *odd ratio* e indica el cambio que sufre la probabilidad condicional dado por el aumento en una unidad de la variable X (o sea el ONI). Específicamente, el odd ratio se expresa en términos del coeficiente β_1:

$$Odd\ ratio = \frac{\frac{p(x+1)}{1-p(x+1)}}{\frac{p(x)}{1-p(x)}} = exp(\beta_1) \quad (2)$$

Para valores positivos (negativos) de β_1, el odd ratio es mayor (menor) que 1 e implica un incremento (disminución) de la probabilidad de ocurrencia de un evento compuesto a medida que aumenta el índice ONI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Eventos compuestos cálidos y secos de verano

El primer paso para estudiar la ocurrencia de meses cálidos y secos consistió en el cálculo de las frecuencias absolutas observadas por las estaciones meteorológicas y estimadas por la base de datos CRU y el reanálisis ERA5 durante el periodo 1979-2018 (Fig. 1). La frecuencia absoluta para cada estación meteorológica y punto de retícula fue definida como el número total de meses con ocurrencia de evento compuesto durante todo el periodo de estudio.

En las frecuencias absolutas de las estaciones meteorológicas, la mayor cantidad de meses cálidos y secos se dieron en el Centro y Noreste de la región de análisis, con un total de 12 eventos en el periodo completo. Por otro lado, las estaciones situadas en el Noroeste Argentino, Cuyo y la Región Pampeana presentaron una menor cantidad de casos (entre 6 y 9).

Con respecto a las otras bases de datos, las frecuencias estimadas por CRU mostraron una distribución espacial similar a las frecuencias que se obtuvieron en base a las estaciones. Las frecuencias absolutas más altas tomaron valores entre 11 y 14 y tuvieron lugar en el sector Centro y Noreste de la región, mientras que las frecuencias más bajas se observaron en el Noroeste Argentino, la Región Pampeana y en Cuyo. Es importante destacar que la frecuencia estimada en esta última región es levemente menor (entre 2 y 7 casos) que la observada en las estaciones.

Por otro lado, ERA5 mostró mayores discrepancias respecto de las frecuencias absolutas observadas. El número absoluto de casos tiende a ser sobreestimado en gran parte de la región, sobre todo en Cuyo y el Noroeste Argentino donde las frecuencias rondan entre los 14 y 20 casos en el periodo total. Rivera et al. (2020) ya mostró que ERA5 presenta dificultades en representar diversas variables en la región andina cuyana. En particular, al comparar CRU y ERA5, observaron que este último sobreestima la temperatura de superficie principalmente entre octubre y abril. Del mismo modo, Balmaceda-Huarte et al. (2021) demostraron que ERA5 presenta dificultades en la representación de índices de extremos climáticos, tanto de temperatura como de precipitación, cerca de la cordillera de los Andes.

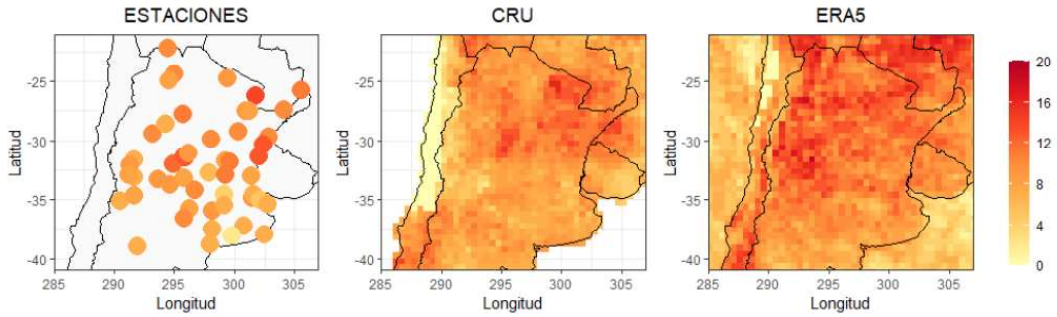


Figura 1. Frecuencias absolutas del periodo 1979-2018 para las estaciones meteorológicas (izq.), CRU (centro) y ERA5 (der.) de meses cálidos y meses secos que ocurren simultáneamente.

Impacto del ENSO: modelado estadístico

A partir de los eventos compuestos detectados en el periodo completo, se estudió cuál es la proporción de los eventos que ocurrieron durante episodios El Niño y cuál es la proporción de eventos que ocurrieron durante La Niña a fin de estudiar la modulación que ejerce el fenómeno del ENSO sobre la ocurrencia de meses cálidos y secos en la región. En la Figura 2 se muestran las frecuencias relativas de eventos compuestos simultáneos que ocurrieron bajo condiciones El Niño y La Niña. Las frecuencias relativas fueron calculadas como número total de eventos durante episodios El Niño y durante episodios La Niña, normalizados por el número total de eventos registrados en el periodo total (frecuencia absoluta, ver Figura 1) para cada estación y punto de grilla. Por ejemplo, si en una estación dada ocurrieron 10 eventos compuestos en el periodo total, de los cuales 5 ocurrieron durante La Niña y 3 durante El Niño, el 50% de los eventos en esa estación fueron dados bajo condiciones La Niña y el 30% de los eventos durante El Niño.
Basándose en los resultados para las estaciones meteorológicas, se observa una mayor ocurrencia de eventos cálidos y secos durante los meses de verano bajo condiciones La Niña que por los afectados por condiciones El Niño. En aquellas estaciones situadas en Cuyo y Centro del país (Córdoba y el norte de la provincia de Buenos Aires) se observa que más del 70% de los eventos detectados ocurrieron durante la fase fría del ENSO. Por otra parte, menos del 30% de los eventos ocurrieron durante episodios El Niño, a excepción de la provincia de Jujuy, donde se registraron entre el 60 y 70% de los casos en esta fase. Estos patrones son adecuadamente representados por las bases CRU y ERA5, aunque se pueden distinguir diferencias en algunas zonas. CRU tiende a sobreestimar la proporción de eventos durante los veranos El Niño en la región de Cuyo, mientras que en el sur de la región Pampeana los tiende a sobreestimar en los veranos La Niña. Además, CRU subestima la notable proporción de eventos en el Noroeste Argentino durante los

veranos El Niño. ERA5, a diferencia de la base CRU, logra representar adecuadamente esta proporción de eventos durante la fase cálida del ENSO. Las principales diferencias de ERA5 respecto a lo observado en estaciones meteorológicas se encuentran durante la fase fría en el sudeste de la región, en la cual se sobreestima la proporción de eventos, y en Cuyo y la región central del país, donde se subestima la ocurrencia de extremos cálidos y secos.

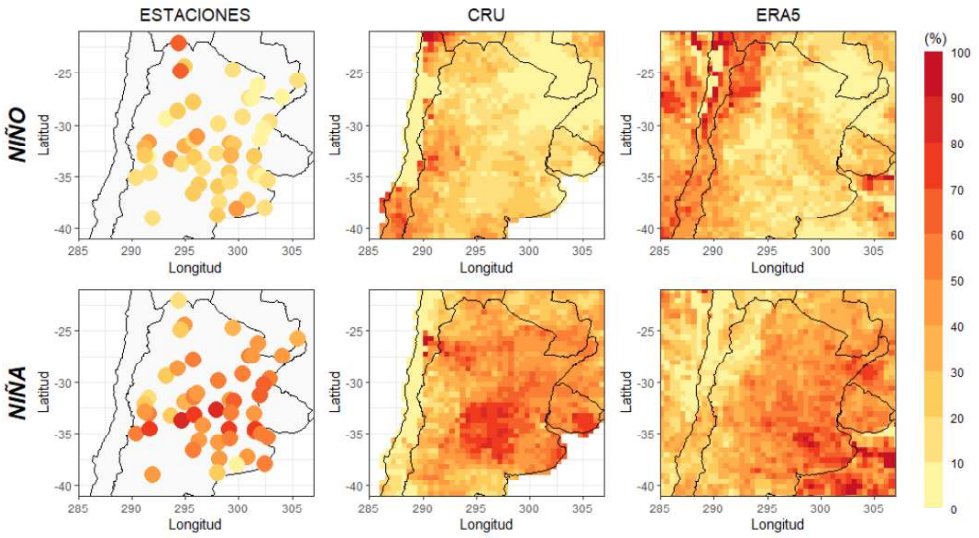


Figura 2. Frecuencias relativas de meses cálidos y secos simultáneos que ocurrieron durante veranos El Niño (sup.) y durante veranos La Niña (inf.) para las estaciones meteorológicas (izq.), CRU (centro) y ERA5 (der.).

Todo lo anterior pone en evidencia el vínculo que existe entre la ocurrencia de meses cálidos y secos de verano y las distintas fases del ENSO. Resulta de gran interés realizar un nuevo análisis que permita modelar y cuantificar esta relación. Siguiendo esta línea, se aplicó un modelo de regresión logística para cada estación meteorológica. Esta técnica estadística es capaz de modelar la probabilidad de ocurrencia de un mes cálido y seco en función de los valores del índice ONI, brindando información sumamente útil para analizar la relación entre el fenómeno y los eventos compuestos en cuestión.

En primer lugar, se aplicó el modelo de regresión logística para estudiar la relación entre la ocurrencia de meses cálidos y secos y las condiciones del ENSO durante el verano. Luego, se derivaron los odd ratios para todas las estaciones meteorológicas (Figura 3.a). Las estaciones que presentaron regresiones logísticas significativas se ubicaron predominantemente en la franja central del país. En todos estos casos, se encontraron valores de odd ratio menores a 1. Esto indica que la probabilidad de ocurrencia de un evento cálido y seco disminuye a medida que aumentan los valores del índice ONI. Todas las estaciones presentaron odd ratios dentro del rango 0,2 y 0,6. Notar que, por ejemplo, un odd ratio de 0,2 implica que por cada aumento en una unidad del valor del ONI se produce una disminución del 80% en la probabilidad de ocurrencia de los eventos. Sin llegar a tener valores significativos, se destaca el comportamiento opuesto que tienen las estaciones del Noroeste Argentino respecto al resto del país, con valores de odd ratio mayores que 1. En este caso, el aumento del índice ONI estaría favoreciendo una mayor probabilidad de ocurrencia de condiciones cálidas y secas en la región.

Siguiendo esta línea, se aplicó nuevamente la técnica de regresión logística para analizar la relación entre los meses cálidos y secos y las condiciones previas del ENSO (Figura

3.b). En este caso se utilizó el trimestre SON del índice ONI para representar el ENSO en los meses previos.

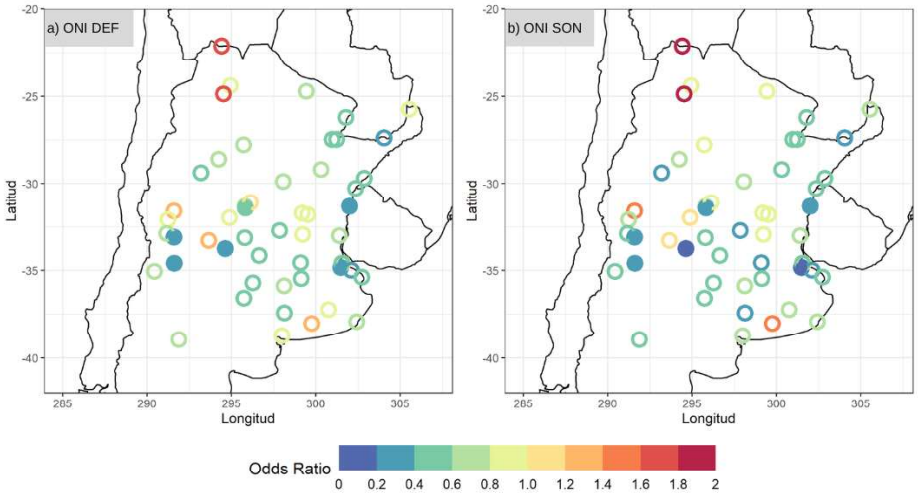


Figura 3. Odd ratio de las regresiones logísticas entre meses cálidos y secos y los trimestres DEF (a) y SON (b) del índice ONI. Los puntos llenos muestran los odd ratios de las regresiones logísticas significativas con un 5% de significancia.

Las estaciones meteorológicas con regresiones significativas coincidieron con las que se obtuvieron para el análisis considerando las condiciones del ENSO durante el verano. En cuanto a los odd ratios, todos los valores significativos resultaron menores a 1 (entre 0 y 0,4). Las condiciones del ENSO de primavera, por tanto, ya anticipan el mismo tipo de relación que se encuentra entre los eventos cálidos y secos y la fase del ENSO del verano.

CONCLUSIONES

Los extremos climáticos multivariados han cobrado gran relevancia en los últimos años en vista de los impactos y efectos adversos que son capaces de generar. En Sudamérica se han estudiado ampliamente los eventos de temperaturas y precipitaciones extremas en forma individual; sin embargo, pocos estudios han analizado la concurrencia de estos eventos. Este trabajo busca establecer las bases y proveer una mejor comprensión de la ocurrencia de eventos con temperaturas extremas y déficits de precipitación durante el verano en Argentina.

En primer lugar, se realizó una caracterización de la ocurrencia de eventos compuestos cálidos y secos durante el verano en la Argentina, al norte de 40°S, considerando como evento compuesto aquellos meses en los cuales la temperatura máxima supere el percentil 80 y la precipitación sea inferior al percentil 20. En base a la estimación de frecuencias absolutas durante el periodo 1979-2018 para un total de 52 estaciones meteorológicas, se registraron las frecuencias más altas en el Centro y Noreste Argentino (hasta 12 eventos), mientras que la Región Cuyana presentó el número más bajo de eventos (6 eventos en el periodo completo).

Considerando que los estudios climáticos requieren series largas de mediciones y que en regiones como el sur de Sudamérica la disponibilidad de datos observacionales es reducida, es necesario considerar otras fuentes de información para poder realizar una caracterización completa de la variabilidad espacio-temporal. Conforme con esto, se decidió incluir las estimaciones de la base de datos observacionales CRU y el reanálisis

ERA5 al estudio de los eventos compuestos. La comparación en base a la estimación de frecuencias absolutas demostró que, tanto CRU como ERA5 logran representar adecuadamente la ocurrencia de meses cálidos y secos, aunque se presentaron algunas discrepancias respecto a las estaciones meteorológicas. En particular, ERA5 presentó una tendencia a la sobrestimación en gran parte de la región, sobre todo en Cuyo y el Noroeste Argentino.

Con el fin de modelar la relación entre los meses cálidos y secos de verano y el fenómeno del ENSO, se aplicó un modelo de regresión logística entre el índice ONI y la ocurrencia de eventos para cada estación meteorológica. Los resultados demuestran que existe una relación significativa entre la ocurrencia de meses cálidos y secos y el ENSO durante el verano en algunas regiones del país. Entre ellas se encuentra Cuyo, el sector centro y la porción este de la región de estudio.

Basándose en el parámetro odd ratio, la ocurrencia de meses cálidos y secos durante el verano se vio favorecida bajo las condiciones generadas durante La Niña. En todas las estaciones donde se obtuvieron resultados estadísticamente significativos, la probabilidad de ocurrencia disminuyó a medida que aumentan los valores del índice ONI. El incremento de una unidad del índice ONI estuvo asociado a una reducción de entre un 40 y 80% en la probabilidad de ocurrencia de meses cálidos y secos. Estos resultados fueron consistentes con Hao et al. (2018), quienes encontraron odd ratios significativos y menores a 1 en zonas dispersas de Argentina al modelar la relación de los eventos compuestos secos y cálidos y el índice El Niño 3.4.

La técnica de regresión logística no sólo permitió modelar y cuantificar la relación entre el ENSO y los meses cálidos y secos de verano, sino que también permitió analizar el impacto de las condiciones previas del ENSO (representadas por el trimestre SON del índice ONI). Este análisis es sumamente útil para predecir la probabilidad de ocurrencia de eventos compuestos en la región de estudio. Las regiones que presentaron regresiones logísticas significativas coincidieron con las que se obtuvieron para el análisis entre los eventos y las condiciones del ENSO durante el verano. En todas ellas se encontró una relación significativa entre las condiciones primaverales del ENSO y la posterior ocurrencia de meses cálidos y secos durante el verano. Nuevamente, se obtuvo que la probabilidad de ocurrencia disminuye a medida que aumentan los valores del índice ONI de primavera. En particular, la reducción de la probabilidad de ocurrencia dada por el aumento en una unidad del índice ONI fluctuó en un rango de 60 y 100%, la cual resultó ser relativamente mayor que la redacción dada por el incremento del índice ONI de DEF. Esto pone en evidencia que la modulación que ejercen las condiciones previas del ENSO es más intensa que la modulación dada por las condiciones del fenómeno durante el verano.

REFERENCIAS

Alexander, L. Climate science: Extreme heat rooted in dry soils. *Nature Geoscience, 4(1),* 12–13. (2011).

Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J. H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., and Cobb, N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, *259(4)*, 660–684. (2010).

Balmaceda-Huarte, R., Olmo, M. E., Bettolli, M. L., and Poggi, M. M. Evaluation of multiple reanalyses in reproducing the spatio-temporal variability of temperature and precipitation indices over southern South America. *International Journal of Climatology*, *41*(12), 5572–5595. (2021).

Barrucand, M., Rusticucci, M., & Vargas, W. Temperature extremes in the south of South America in relation to Atlantic Ocean surface temperature and Southern Hemisphere circulation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres, 113(20)*. (2008).

Barrucand, M., Vargas, W., and Bettolli, M. L. Warm and cold dry months and associated circulation in the humid and semi-humid Argentine region. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *123(3–4)*, 143–154. (2014).

Durre, I., Wallace, J. M., & Lettenmaier, D. P. Dependence of Extreme Daily Maximum Temperatures on Antecedent Soil Moisture in the Contiguous United States during Summer. *Journal of climate, 13(14)*, 2641-2651.(2000).

Feng, S., and Hao, Z. Quantitative contribution of ENSO to precipitation-temperature dependence and associated compound dry and hot events. *Atmospheric Research*, *260*. (2021).

Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Vidale, P. L., Lüthi, D., & Schär, C. Soil moisture-atmosphere interactions during the 2003 European summer heat wave. *Journal of Climate, 20(20)*, 5081–5099. (2007)

Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., de Groot, W. J., Wotton, B. M., and Gowman, L. M. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire , 18(5),* 483–507. (2009).

Hao, Z., Hao, F., Singh, V. P., and Zhang, X. Quantifying the relationship between compound dry and hot events and El Niño–southern Oscillation (ENSO) at the global scale. *Journal of Hydrology*, *567*, 332–338. (2018).

Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., and Lister, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, *7*(1). (2020).

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., … Thépaut, J. N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999–2049. (2020).

Hirschi, M., Seneviratne, S. I., Alexandrov, V., Boberg, F., Boroneant, C., Christensen, O. B., Formayer, H., Orlowsky, B., & Stepanek, P. Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe. *Nature Geoscience, 4(1)*, 17–21. (2011).

Jiang, Y., and Huang, B. Effects of Drought or Heat Stress Alone and in Combination on Kentucky Bluegrass. *Crop Sci.*, 40: 1358-1362. (2000).

Llano, M. P., & Penalba, O. C. A climatic analysis of dry sequences in Argentina. International *Journal of Climatology, 31(4),* 504–513. (2011).

Mueller, B., and Seneviratne, S. I. Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(31),* 12398–12403. (2012).

Mukherjee, S., Ashfaq, M., and Mishra, A. K. Compound Drought and Heatwaves at a Global Scale: The Role of Natural Climate Variability-Associated Synoptic Patterns and Land-Surface Energy Budget Anomalies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *125*(11). (2020).

Olmo, M. E., & Bettolli, M. L. Extreme daily precipitation in southern South America: statistical characterization and circulation types using observational datasets and regional climate models. *Climate Dynamics, 57(3–4)*, 895–916. (2021).

Penalba, O. C., & Robledo, F. A. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change, 98(3),* 531–550. (2010).

Raymond, C., Horton, R. M., Zscheischler, J., Martius, O., AghaKouchak, A., Balch, J., Bowen, S. G., Camargo, S. J., Hess, J., Kornhuber, K., Oppenheimer, M., Ruane, A. C., Wahl, T., and White, K. Understanding and managing connected extreme events. *Nature Climate Change, 10(7),* 611–621. Nature Research. (2020).

Rivera, J. A., Naranjo Tamayo, E., and Viale, M. Water Resources Change in Central-Western Argentina Under the Paris Agreement Warming Targets. *Frontiers in Climate*, *2*. (2020).

Rivera, Juan Antonio, Penalba, O. C., & Bettolli, M. L. Inter-annual and inter-decadal variability of dry days in Argentina. *International Journal of Climatology, 33(4),* 834–842. (2013).

Robledo, F. A., & Penalba, O. C. Análisis estacional de la frecuencia diaria y la intensidad de los extremos de precipitación sobre el sudeste de Sudamérica. *Meteorológica*, *32*(1-2), 31-49. (2007).

Rusticucci, M., & Barrucand, M. Observed Trends and Changes in Temperature Extremes over Argentina. *Journal of climate, 17(20),* 4099-4107. (2003)

Rusticucci, M., Barrucand, M., & Collazo, S. Temperature extremes in the Argentina central region and their monthly relationship with the mean circulation and ENSO phases. *International Journal of Climatology, 37(6),* 3003–3017. (2017).

Rusticucci, M. and Penalba O. Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature. *Climate Research, 16(1)*, 1-15. (2000).

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A. J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews, 99(3–4)*, 125–161. (2010).

Wilks, D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.* 3rd Edition, Academic Press, Oxford. (2011).

PERCEPCIONES DE LA PROBLEMÁTICA OCEÁNICA EN UNA AUDIENCIA DE JORNADA ACADÉMICA

Marcelo L. Morales Yokobori[a,b], D. Carolina Castellanos Arévalo[a]

[a]*Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Belgrano, ARGENTINA.*
[b]*Mundus maris, BÉLGICA.*

e-mail: dmp@comunidad.ub.edu.ar

RESUMEN

Se realizó una encuesta para conocer la percepción y el grado de información de un grupo de personas sensibilizadas con la problemática del océano al inscribirse voluntariamente a un encuentro académico gratuito, en formato híbrido, sobre el cuidado del océano para el Día Mundial del Océano 2022. Participaron 223 personas. Las respuestas mostraron en general buen grado de información por parte de los encuestados, con algunas sutiles diferencias entre personas más cercanas a la costa y aquellas más alejadas, como porcentajes de áreas marinas protegidas. Respecto a propuestas de acción para revitalizar el océano (motivo del Día Mundial del Océano 2022) en una nube de palabras predominó el tema de educación ambiental seguido de la problemática de contaminación.

Palabras Clave: Encuesta, Océano, Sobrepesca, Contaminación, Cambio Climático

INTRODUCCIÓN

En la cumbre del G20, en 2017 (Hamburgo, Alemania), se adoptó un plan de acción sobre basura marina, a los fines de promover campañas de información pública en ciudadanos y empresas para reducir la generación de desechos e impulsar el reúso de materiales, así como facilitar la participación de la sociedad en la gestión responsable de los residuos (Barnett et al, 2018). En este trabajo se buscó conocer la percepción sobre el estado del océano y sus problemáticas en un grupo de personas interesadas y/o comprometidas con este tema. Para ello se elaboró una encuesta cuyas preguntas versaron sobre temas relevantes al daño que está sufriendo el océano. Este alberga un número desconocido de especies, estimado en alrededor del millón, eventualmente superando los dos millones (UNESCO, 2022; Mora et al, 2011). Desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, este inmenso medio de vida representa la fuente del 50 al 90% de la proteína consumida en las economías pequeñas y/o vulnerables (Holl-Buhl, 2017). Pero el océano está sufriendo una serie de cambios perjudiciales para la vida, principalmente atribuibles, directa o indirectamente, a factores antropogénicos. Entre estos factores destacan la contaminación, el cambio climático, la acidificación, la sobrepesca y la destrucción de hábitats por variadas causas (Morales Yokobori, 2020b).

Una de las principales contribuciones del océano es la de aportar la mayor parte del oxígeno atmosférico que respiramos, siendo alrededor del 70% (University of California Museum of Paleontology, s.f.) o hasta del 85% (Ackerman, 2019), según los autores.

La basura marina contiene elementos desechados por la gente, los cuales llegan a los ríos, lagos y océanos por negligencia, la cual puede expresarse como descarte directo sobre los cuerpos de agua y costas aledañas o mediante el transporte por vientos, escorrentías o corrientes de agua desde distintas fuentes de contaminación, resultando una gran amenaza (UNEP, 2021).

Particularmente, los plásticos son la más grande, dañina y persistente fracción de esta basura marina, representando al menos un 85% de estos desechos (UNEP, 2021). Se estima que anualmente son 13 millones de toneladas que se vierten al océano (UNDP, s.f.). Estos pueden asfixiar y envenenar a los animales marinos. Pero, adicionalmente, sufren en el ambiente una degradación fisicoquímica que resulta de su exposición a la radiación solar, el viento y las corrientes marinas, transformándose así en los llamados microplásticos, pequeñas fracciones de ese material menores a los 5mm (GESAMP, 2015; GESAMP, 2016; Prokić et al, 2021; Schirinzi et al, 2020; Pagano et al, 2019; Allen et al, 2019). Quedan incluidas en este amplio conjunto las microfibras sintéticas derivadas de petróleo, propias de las telas modernas utilizadas para la confección de prendas de vestir.

También los derrames de petróleo han significado sucesos de alto impacto ecológico sobre los mares. Para ellos se consideran diversas metodologías de remediación, destacándose entre ellas el control biológico con microorganismos debido a su eficiencia y baja agresividad con el ambiente (Chatterjee et al, 2022; Pete et al, 2021).

El cambio climático es el resultado también de un tipo particular de contaminación, en este caso con gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono o el metano liberados en exceso en la tropósfera, causando un aumento de la temperatura promedio del planeta. Este resultado, a su vez, provoca efectos subsiguientes como el aumento del nivel del mar por derretimiento de hielos. Pero otro efecto concurrente del exceso de emisión del dióxido de carbono es el aumento del ácido carbónico disuelto en el océano, con la consecuente acidificación de sus aguas. Pagando este precio, el océano contribuye a mitigar el agravamiento del efecto invernadero (Organización de Naciones Unidas, 2021). Esta acidificación puede afectar negativamente a los organismos marinos que utilizan la calcificación para desarrollar sus exoesqueletos, como los corales y moluscos, modificando así los hábitats y la red alimentaria marina. Adicionalmente, desde mediados de la primera década de este siglo, se han incrementado la cantidad de estudios que interpretan el cambio climático y la basura marina como fenómenos que impactan en conjunto más que separadamente (Lincoln et al, 2022; Morales-Yokobori, 2020).

Otro gran flagelo en los mares es la sobrepesca, resultado de una extracción excesiva de recursos vivos del agua, de tal manera de poner en riesgo el equilibro poblacional de las especies capturadas o afectadas, reduciendo incluso la resiliencia de estas especies marinas frente al cambio climático (Sumaila & Tai, 2020). Es decir, la sobrepesca conduce al agotamiento de los recursos pesqueros. Los afectados más directos de este flagelo son los pescadores artesanales, quienes representan el 96% de todo el espectro de pescadores (Holl-Buhl, 2017). Asimismo, es uno de los factores considerados como estresores de las redes o cadenas tróficas (Maureaud et al, 2017). La sobrepesca suele suceder por ausencia de regulaciones efectivamente aplicadas que permitan un manejo sustentable de la actividad pesquera. Asimismo, la actual capacidad tecnológica de localización de cardúmenes y de sistemas eficientes de pesca favorecen las masivas capturas industriales. La sobrepesca es considerada la peor amenaza para el océano, seguida del calentamiento global y la acidificación (Pauly, 2014; Froese, 2014; Sumaila & Tai, 2020).

Con todas estas problemáticas mencionadas todavía no alcanzamos el 10% de áreas marinas protegidas propuesto como meta en objetivo de desarrollo sostenible de la Agenda 2030 de la Organización de Naciones Unidas (IUCN, 2017; Organización de Naciones Unidas, s.f.).

Todas estas problemáticas descriptas fueron vertidas en la encuesta para conocer el tipo de respuestas de un público sensibilizado con el cuidado del océano, al manifestar su interés con la inscripción a una jornada académica abierta, gratuita y en formato híbrido.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Desde hace varios años, la Universidad de Belgrano, junto a *Mundus maris*, organiza una jornada académica con disertaciones de especialistas nacionales y extranjeros en la semana del 8 de junio, día mundial del océano establecido por la Organización de las Naciones Unidas. En el momento de la inscripción se invitó a los participantes del evento a responder una encuesta con el objeto de estimar el grado de conocimiento y percepción sobre la problemática actual del océano. La misma fue elaborada con la colaboración de los alumnos de la cátedra de Recursos Marinos de la Universidad de Belgrano, camada 2022, y la organización *Mundus maris*.

Se utilizaron Facebook e Instagram para la difusión de la jornada académica, debido al gran alcance y rapidez de estas redes sociales para dar a conocer el evento. De esta forma se pudo alcanzar una variedad de personas de diferentes edades, niveles educativos y ubicaciones geográficas en países de habla hispana de Iberoamérica. Para ello, se estableció el siguiente perfil de búsqueda:

- Edad (años): 16+
- Países de habla hispana seleccionados: Argentina, Chile, Colombia, Ecuador, El Salvador, España, Guatemala, México, Panamá, Perú, República Dominicana.
- Categorías de intereses de Facebook utilizadas: explotación pesquera, pesca (actividades al aire libre), acuicultura, ecoturismo (viajes y turismo), derecho ambiental, pescados y mariscos (comida y bebida), medioambiente (ciencia), biología (ciencia), mar (masa de agua), océanos, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- No se especificó un nivel educativo determinado.

Según las indicaciones de Facebook se alcanzaron 282 600 cuentas, obteniéndose 2699 clics en el enlace, con un total de 266 inscripciones en la jornada académica y un total de 223 respuestas. La plataforma utilizada para la inscripción y participación en la encuesta fue SurveyMonkey.

Al tratarse de una encuesta dirigida a un público participante de una jornada académica sobre el tema del océano, el conjunto de respuestas no representó a una población general sino sesgada hacia un sector interesado en estos temas. La participación fue voluntaria y la encuesta consistió en 8 preguntas de selección múltiple, dos de ranking y una abierta. Considerando que muchos valores numéricos como la cantidad de plásticos presentes en el océano o especies marinas actuales suelen ser objeto de discusión, se optó por establecer opciones de respuestas que reflejasen distintos órdenes de magnitud antes que números simplemente distintos.

En la pregunta abierta, se les pidió que propusieran acciones para revitalizar el océano, en concordancia con el lema de la Organización de Naciones Unidas para el Día Mundial del Océano celebrado el año pasado. Para analizar la nube de palabras obtenida de las respuestas a esta pregunta se simplificaron términos de significados claramente similares para evitar redundancias.

Las preguntas utilizadas se pueden leer en las Fig. 1, 2 y 3. Para confeccionar los gráficos se utilizaron SurveyMonkey y Excel Microsoft 365. Se utilizó Google Earth para estimar

las distancias entre el lugar de trabajo declarado y la costa marítima más cercana, separando en dos grupos de tamaño similar con un valor de distancia umbral de 100 km.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la introducción de este trabajo se sintetizaron las principales problemáticas que afronta el océano, incluyendo valores y consideraciones expresadas por especialistas y organismos internacionales reconocidos. Este respaldo nos permitió analizar las respuestas obtenidas en función del conocimiento actual sobre el tema, con el objeto de poder estimar los niveles de información y percepción de los encuestados.

Tabla I. Porcentaje de respuestas (223 en total) según países de habla hispana en Latinoamérica y España. Se observa una mayor participación de Argentina, seguido de México.

Países	Porcentaje de participación
Argentina	48,50
México	18,05
Ecuador	7,89
Perú	6,39
Colombia	6,02
Guatemala	5,64
Chile	1,88
El Salvador	1,13
España	1,13
República Dominicana	1,13
Panamá	0,38
Uruguay	0,38

La cantidad de participantes en la encuesta varió en función de los países (ver Tabla I). Sobre un total de 223 respuestas, la mayoría (48,5%) provino de Argentina, país donde se organizó y celebró la jornada académica convocante. Le siguió México con un 18,05% y, en menor medida, Ecuador, Perú, Colombia y Guatemala. Excepto Argentina, en general, el grado de participación en la encuesta coincidió con los niveles poblacionales de los países. Mayoritariamente, las respuestas de selección múltiple coincidieron con las consideradas correctas, mostradas por los recuadros, como se puede contemplar en la Fig. 1.

Respecto a las preguntas de ranking, la sobrepesca no figuró como principal preocupación en la población encuestada, cuando es considerada el mayor flagelo actual del océano (ver Fig. 3). Tampoco se observó una relevante ocurrencia de este término en la nube de palabras, obtenida en base a las respuestas de la pregunta abierta (ver Fig. 4). En relación con una escala de niveles de impacto sobre el océano, causado por diversos factores antropogénicos, las respuestas resultaron bastante parejas, como se puede observar en la Fig. 3a, dando prioridad al cambio climático, seguido de explotación minera y petrolera, sobrepesca y en último lugar polución. No obstante, en la nube de palabras, términos como contaminación o asociados a este como plásticos están presentes (ver Fig. 4).

En la Fig. 1c se resalta el sobredimensionamiento de la riqueza de especies expresada en las respuestas. En la Fig. 2c, se observa que son las personas más próximas a la costa, y esperablemente más vinculadas al mar, quienes tienden a responder los valores más altos de cantidad de especies, aunque no es lo actualmente estimado por la comunidad científica. Asimismo, en la Fig. 2f, se observa que el grupo más cercano a la costa muestra también mayor conocimiento sobre los porcentajes actuales de superficies marinas protegidas, al ser quienes más indican que esta área es inferior al 10% del océano. Aunque en ambos grupos predominó esta respuesta sobre las demás.

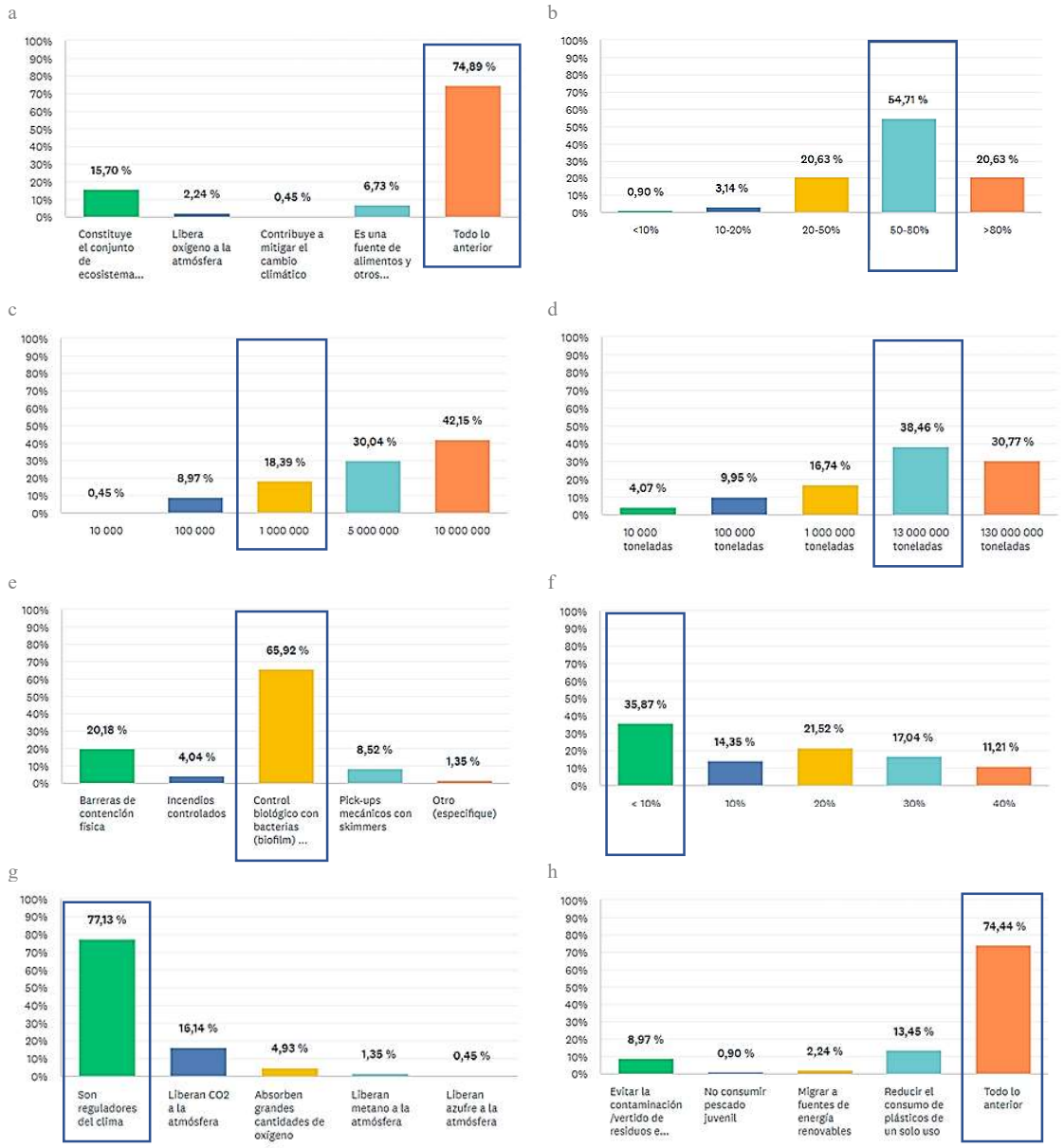


Figura 1. Preguntas cerradas. **a**- ¿Por qué crees que el océano es importante?, **b**- ¿Qué porcentaje del oxígeno atmosférico total crees que libera el océano, **c**- ¿Cuántas especies se estima que habitan en el océano?, **d**- ¿Cuánto plástico se estima que termina en el océano anualmente?, **e**- ¿Qué alternativa se considera que tiene el menor impacto ecológico para tratar los derrames de petróleo en el océano?, **f**- ¿Qué porcentaje del océano son áreas marinas protegidas?, **g**- ¿Qué papel juega el océano en el cambio climático?, **h**- ¿Qué acciones colectivas crees que podrían tomarse para proteger el océano?. 223 respuestas, excepto pregunta d- con 221 respuestas. Las respuestas en recuadros son las consideradas correctas en base a las fuentes bibliográficas consultadas.

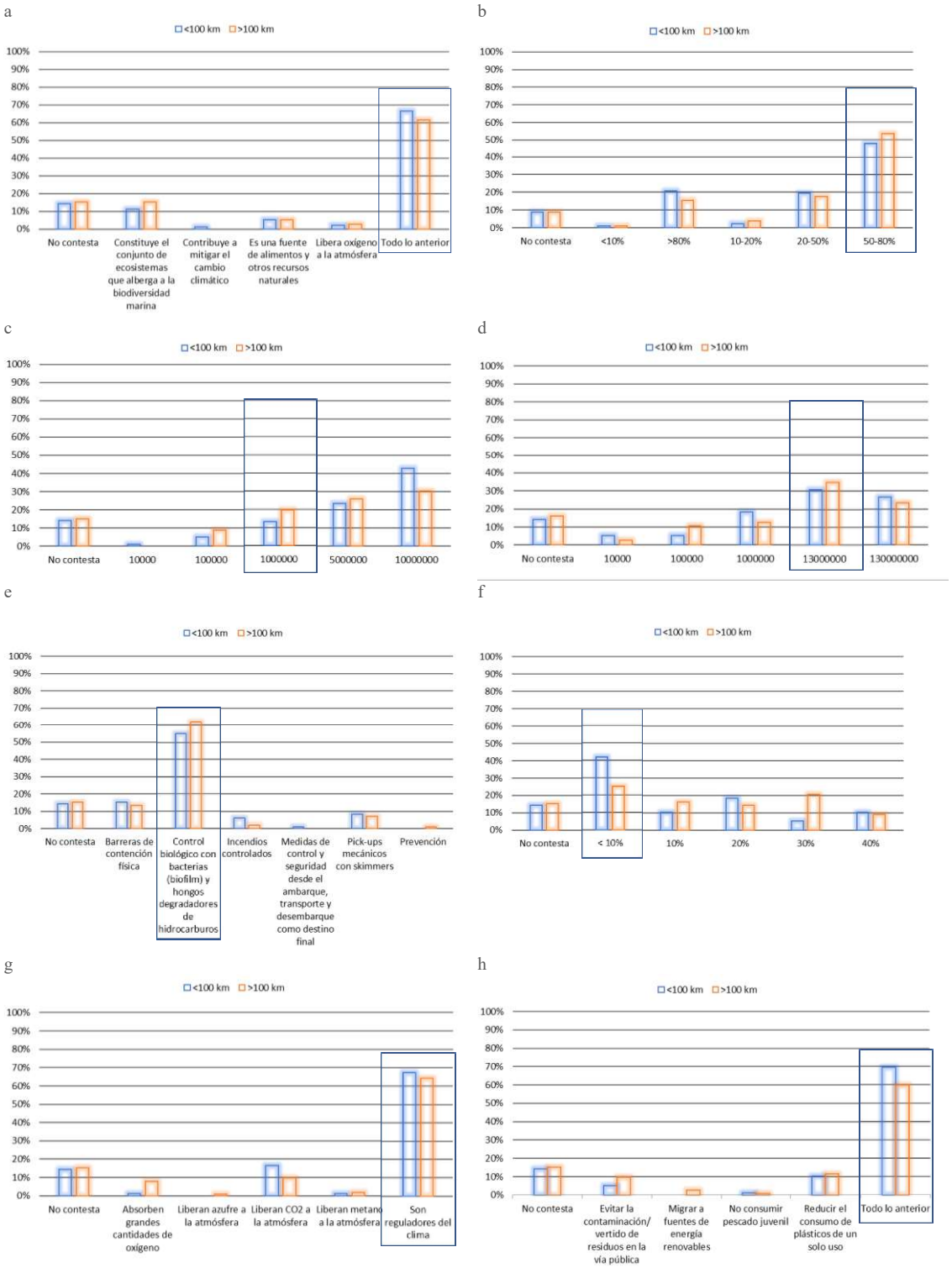


Figura 2: Preguntas cerradas. **a**- ¿Por qué crees que el océano es importante?, **b**- ¿Qué porcentaje del oxígeno atmosférico total crees que libera el océano, **c**- ¿Cuántas especies se estima que habitan en el océano?, **d**- ¿Cuánto plástico se estima que termina en el océano anualmente?, **e**- ¿Qué alternativa se considera que tiene el menor impacto ecológico para tratar los derrames de petróleo en el océano?, **f**- ¿Qué porcentaje del océano son áreas marinas protegidas?, **g**- ¿Qué papel juega el océano en el cambio climático?, **h**- ¿Qué acciones colectivas crees que podrían tomarse para proteger el océano? 156 respuestas. Las respuestas en recuadros son las consideradas correctas en base a las fuentes bibliográficas consultadas.

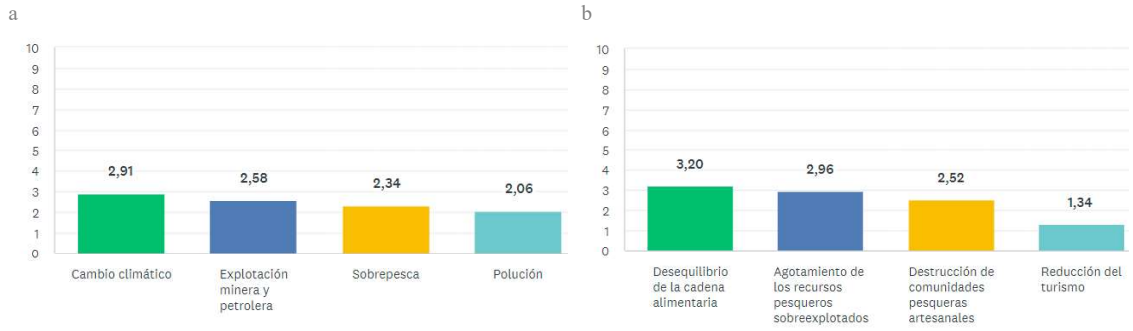


Figura 3: Preguntas de ranking. Preguntas: **a-** En una escala del 1 al 4 (siendo 4 el de mayor impacto) ¿Qué grado de impacto sobre el océano le darías a las siguientes amenazas? 222 respuestas. **b-** Pregunta: En una escala del 1 al 4 (siendo 4 la principal consecuencia) ¿cuáles consideras que son las principales consecuencias de la sobrepesca? 223 respuestas. Los valores sobre las columnas indican los promedios entre todos los valores asignados en la muestra.



Figura 4: Nube de palabras en base a las respuestas sobre necesidades y estados del océano. El 62% de los encuestados (167 respuestas) aportó las siguientes palabras vinculadas a las necesidades y el estado de los océanos, resultando educación ambiental el más señalado. Principalmente se observa ocurrencia de palabras, como residuos, plásticos o reutilizar, vinculadas a la contaminación, estando esta última presente con mayor énfasis.

CONCLUSIONES

Las encuestas nos permiten conocer mejor el grado de percepción y conocimiento que las personas interesadas en la problemática actual del océano presenta. De esta manera, desde las organizaciones vinculadas al cuidado del mar y su diversidad pueden enfocar mejor su accionar, incluyendo campañas de concientización.

El cambio climático y la contaminación es un tema sumamente presente en la población encuestada, demostrando en general buena información sobre los impactos que generan distintos factores antropogénicos. No obstante, otros temas de suma importancia como la

sobrepesca parecen no estar lo suficientemente presentes en la conciencia de las personas sensibilizadas con el mar.

REFERENCIAS

Ackerman, S. J. (12 de Septiembre de 2019). *Alum Kyle Van Houtan Leads Science Programs for Monterey Bay Aquarium*. Duke - Nicholas School of the Environment: https://nicholas.duke.edu/news/alum-kyle-van-houtan-leads-science-programs-monterey-bay-aquarium

Allen, S., Allen, D., Phoenix, V., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., . . . Galop, D. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *nature geoscience, 12*, 339–344. https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5

Barnett, S., Emorine, H., Group, G. R., Shelepov, A., Ignatov, A., & Research, C. f. (2018). *2017 G20 Hamburg Summit Final Compliance Report.* University of Toronto, munk school of global affairs and public policy. University of Toronto. http://www.g20.utoronto.ca/compliance/2017hamburg-final/2017-g20-compliance-final.pdf

Chatterjee, S., Kumari, S., Rath, S., & Das, S. (2022). Prospects and scope of microbial bioremediation for the restoration of the contaminated sites. En S. Das, & H. R. Dash, *Microbial Biodegradation and Bioremediation.Techniques and Case Studies for Environmental Pollution* (págs. 3-31). Elsevier.

Froese, R. (20 de septiembre de 2014). Interview with Dr. Rainer Froese, FishBase Coordinator. (C. Nauen, Entrevistador) https://www.youtube.com/watch?v=sHv3cTRClxk&t=101s

GESAMP. (2015). *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment (Part 1).* International Maritime Organization. http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90

GESAMP. (2016). *Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment (Part 2).* International Maritime Organization. http://www.gesamp.org/publications/microplastics-in-the-marine-environment-part-2

Holl-Buhl, A. (5 de abril de 2017). Artisanal fishers are on the frontline of the overfishing crisis. (UNCTAD, Entrevistador)

IUCN. (noviembre de 2017). *Marine protected areas and climate change*. Issues Brief: https://www.iucn.org/resources/issues-brief/marine-protected-areas-and-climate-change

Lincoln, S., Andrews, B., Birchenough, S. N., Chowdhury, P., Engelhard, G. H., Harrod, O., . . . Townhill, B. L. (2022). Marine litter and climate change: Inextricably connected threats to the world's oceans. *Science of The Total Environment, 837*(155709). https://doi.org/doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155709

Maureaud, A., Gascuel, D., Colléter, M., Palomares, M., Du Pontavice, H., Pauly, D., & al., e. (2017). Global change in the trophic functioning of marine food webs. *PLoS ONE, 12*(8), e0182826. https://doi.org/doi.org/10.1371/journal.pone.0182826

Mora, C., Tittensor, D. P., Adl, S., Simpson, A. G., & Worm, B. (2011). How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? *Plos Biology, 9*(8). https://doi.org/doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127

Morales Yokobori, M. L. (28 de septiembre de 2020b). Los recursos marinos argentinos y sus amenazas. (M. C. Degrossi, Entrevistador) https://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=los_recursos_marinos_argentinos_y_sus_amenazas&id=3824

Morales-Yokobori, M. L. (2020). Contribution to the understanding of rainfalls occurring in Buenos Aires city (Argentina) between 1960 and 2018. *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (2nd Edition): Proceedings*

of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-2), Tunisia 2019. Soussa: Springer.

Organización de Naciones Unidas. (27 de abril de 2021). *Los océanos pueden pasar de ser sumideros del carbono a converirse en sus chimeneas, y acelerar el cambio climático*. Noticias ONU: https://news.un.org/es/story/2021/04/1491382#:~:text=La%20absorción%20de%20dióxido%20de,un%20elemento%20más%20de%20calentamiento.

Organización de Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos*. Objetivos de desarrollo sostenible: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/oceans/

Pagano, M., V. I., G. A., & Caracappa, G. F. (2019). Hematological and biochemical parameters in Sea turtles (Caretta caretta) after stranding). *Regional Studies in Marine Science, 32*, 100832. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100832.

Pauly, D. (27 de enero de 2014). Interview with Prof. Daniel Pauly about the threats to the oceans and necessary counter-measures. (C. Nauen, Entrevistador) Mundus maris YouTube channel: https://www.youtube.com/watch?v=9Vvql32SIjY

Pete, A. J., Bharti, B., & Benton, M. G. (2021). Nano-enhanced Bioremediation for Oil Spills: A Review. *ACS EST Engg., 1*, 928-946. https://doi.org/doi.org/10.1021/acsestengg.0c00217

Prokić, M. D., Gavrilović, B. R., Radovanović, T. B., Gavrić, J. P., Petrović, T. G., Despotović, S. G., & Faggio, C. (2021). Studying microplastics: Lessons from evaluated literature on animal model organisms and experimental approaches. *Journal of Hazardous Materials, 144*, 125476. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125476

Schirinzi, G. F., Pedà, C., Battaglia, P., Laface, F., Galli, M., Baini, M., . . . Romeo, T. (2020). A new digestion approach for the extraction of microplastics from gastrointestinal tracts (GITs) of the common dolphinfish (Coryphaena hippurus) from the western Mediterranean Sea,. *Journal of Hazardous Materials,, 397*, 122794. https://doi.org/doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122794

Sumaila, U. R., & Tai, T. C. (2020). End Overfishing and Increase the Resilience of the Ocean to Climate Change. *frontiers in Marine Science, 7*(523). https://doi.org/doi: 10.3389/fmars.2020.00523

UNDP. (s.f.). *A tidal wave of plastic*. Retrieved 10 de febrero de 2023, from United Nations Development Programme: https://feature.undp.org/plastic-tidal-wave/

UNEP. (21 de Octubre de 2021). *From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution*. UN Environment Programme: https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution

UNESCO. (21 de abril de 2022). *Ocean life: the marine Age of Discovery*. News: https://www.unesco.org/en/articles/ocean-life-marine-age-discovery#

University of California Museum of Paleontology. (s.f.). *Oxygen levels*. UNDERSTANDING GLOBAL CHANGE: https://ugc.berkeley.edu/background-content/oxygen-levels/#:~:text=Oxygen%20is%20produced%20by%20photosynthesizing,of%20oxygen%20in%20the%20atmosphere.

ATENUACIÓN DE RUIDO EN SECCIONES SÍSMICAS MEDIANTE LA DESCOMPOSICIÓN EN MODOS EMPÍRICOS F-X

Marcos H. Muzi[a], Julián L. Gómez[b] y Danilo R. Velis[c]

[a]*Departamento de Física, Universidad Nacional del Sur, ARGENTINA*
[b]*CONICET e Y-TEC, ARGENTINA*
[c]*CONICET y Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*

e-mail: marcoshmuzi@gmail.com

RESUMEN

Uno de los principales objetivos en el procesamiento sísmico es realzar las señales de interés atenuando la energía no deseada del ruido aleatorio y coherente. En este trabajo, exploramos un método adaptativo llamado descomposición en modos empíricos (EMD), el cual separa una señal en modos oscilatorios simples. Para atenuar el ruido en secciones sísmicas, implementamos EMD en el dominio frecuencia-offset (f-x). El método f-x EMD consiste en transformar cada traza del dato original al dominio de las frecuencias y luego eliminar el primer modo oscilatorio en la dirección del offset. Aplicamos el método en secciones sintéticas y datos de campo comparando los resultados con el método ampliamente difundido de la deconvolución f-x. Los resultados mostraron que, a diferencia de f-x decon, f-x EMD reduce tanto el ruido aleatorio como el coherente con pérdidas de señal mínimas. A su vez, implementamos una estrategia para expandir f-x EMD con el propósito de atenuar el ruido en cubos sísmicos 3D. La estrategia consiste en procesar cada sección inline del dato y luego cada sección crossline del resultado con f-x EMD. Para evaluar el rendimiento del método en situaciones complejas, aplicamos f-x EMD 3D a un volumen sísmico sintético contaminado con ruido aleatorio que contenía áreas con grandes buzamientos. Como se esperaba, los eventos plegados empeoran el funcionamiento tanto de f-x EMD como de la deconvolución f-x, resultando en pérdida de la señal. Repitiendo el procesamiento en el residuo y añadiéndolo al resultado previo reducimos notablemente la pérdida de señal en f-x EMD. Sin embargo, no observamos beneficio similar usando esta técnica con la deconvolución f-x. Los resultados en datos 2D y 3D demuestran que f-x EMD es una herramienta valiosa y flexible para atenuar ruido tanto aleatorio como coherente en volúmenes sísmicos que presentan estructuras de media a alta complejidad.

Palabras Clave: Algoritmo, Procesamiento.

INTRODUCCIÓN

En prospección sísmica, pueden encontrarse diversas fuentes de ruido que disminuyen la calidad de los registros obtenidos. De esta forma, se define como ruido a toda señal que no sea la información objetivo de la exploración. Existen diversos tipos de ruido. En primer lugar, se encuentra el ruido *aleatorio*, el cual es inherente a cualquier análisis de señales. Éste incluye el ruido en la dirección temporal y en la dirección espacial, el cual no se puede correlacionar traza a traza. Por lo general, el primero aumenta a medida que el tiempo de medición es mayor. Además, existe el ruido *coherente*. Dentro de esta categoría se encuentra el ruido de origen *lineal*, frecuente en registros marinos de poca profundidad, las reverberaciones y las ondas múltiples.

El objetivo de este trabajo es describir e indagar en la aplicación del algoritmo descomposición en modos empíricos (EMD, *empirical mode decomposition*), como alternativa de trabajo, para la atenuación de ruido en secciones sísmicas. El algoritmo

EMD fue inicialmente propuesto por Huang et. al. (1998) con el propósito de descomponer señales tanto estacionarias como no estacionarias. Luego Battista et. al. (2007) presenta una adaptación para remover el ruido en datos sísmicos de reflexión. Bekara y van der Baan (2009) utilizan EMD en el dominio espacio frecuencia (f-x), aplicandolo en varios registros sísmicos obteniendo resultados favorables.

Con la finalidad de atenuar ruido en registros sísmicos, tanto aleatorio como coherente, se aplica el método EMD en el dominio f-x. En éste dominio, existen métodos efectivos para ello, tal como el filtrado predictivo en la dirección espacial propuesto por Canales (1984). La idea utiliza la predictibilidad de la señal para poder separarla del ruido aleatorio. Para esto, Canales asume que las señales son lineales y estacionarias, hipótesis que no suele cumplirse en registros sísmicos. Para lidiar con este problema, los métodos convencionales trabajan con pequeñas ventanas en el dominio espacial donde se cumplen las condiciones antes mencionadas.

En cambio, cuando se utiliza EMD no es necesario que la señal cumpla la hipótesis de ser linear y estacionaria. El algoritmo se adapta al dato en el cual se emplea. Es decir, no es necesario asumir ciertas propiedades del mismo. Esta capacidad de adaptarse es una de las principales virtudes del algoritmo.

DESCOMPOSICIÓN EN MODOS EMPÍRICOS

El método descomposición en modos empíricos consiste en separar una señal en funciones oscilatorias con un ancho de banda limitado. El algoritmo considera que la señal es una suma de modos oscilatorios de frecuencias distintas. Cada una de éstas, denominadas funciones de modo intrínseco (IMF, *intrinsic mode function*), debe satisfacer dos condiciones (Huang, N y Wu, Z., 2008):

1. El número de extremos y el número de ceros debe ser igual o diferir en una unidad;
2. El valor medio de la envolvente definida usando los máximos locales y la envolvente definida usando los mínimos locales debe ser nula.

Dada la definición de IMF, cualquier función puede descomponerse utilizando un proceso iterativo (conocido como *sifting* en la literatura). El proceso inicia identificando los extremos locales, tanto los máximos como los mínimos (ver Fig. 1). Luego, se unen dichos extremos mediante un polinomio de tercer grado formando dos envolventes, una inferior y una superior. La media de ambas es llamada m_1. La diferencia entre la señal y la media se define como h_1:

$$h_1(t) = x(t) - m_1 \tag{1}$$

 ISBN: 978-987-1323-89-0

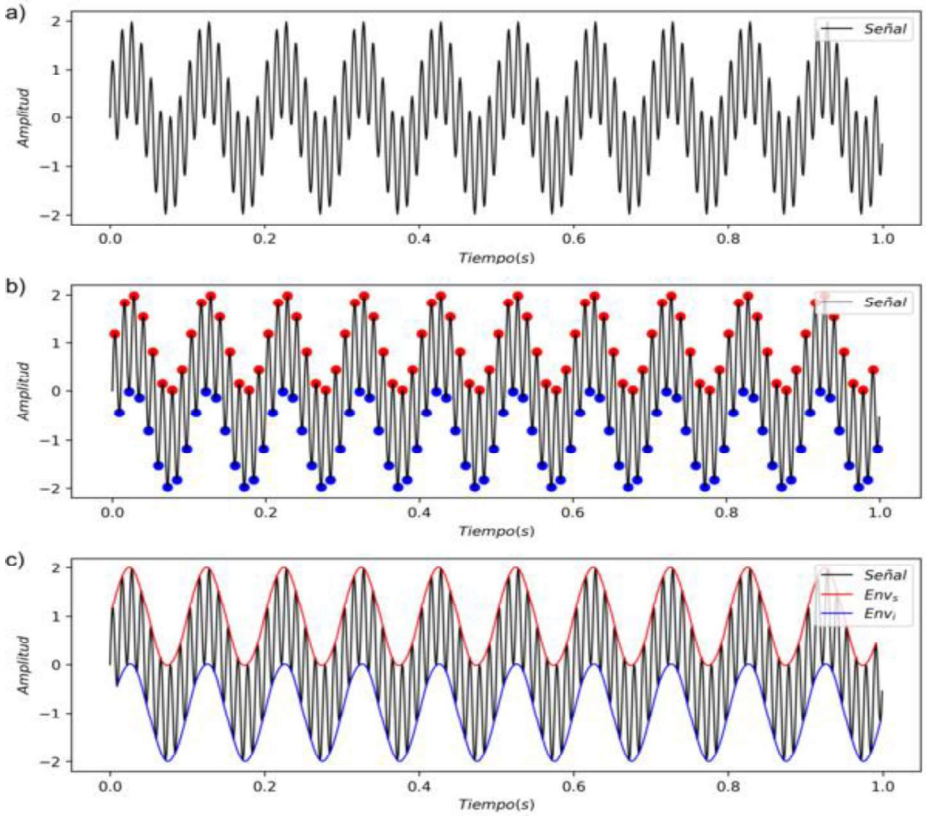


Figura 1. Paso a paso del proceso EMD. **a**. Señal de entrada. **b**. Los círculos rojos indican los máximos locales y los azules los mínimos locales. **c**. La línea roja indica la envolvente superior y la línea azul la envolvente inferior.

Por construcción, se espera que h_1 cumpla las condiciones de una IMF. Sin embargo, esto no suele cumplirse. Por lo tanto, es necesario realizar un proceso iterativo. El proceso tiene dos intenciones:

1. Eliminar la información que no pertenezca a la IMF.
2. Hacer el perfil de onda simétrico.

Las iteraciones deben continuar mientras la señal extraída no cumpla las condiciones para ser una IMF. Durante el proceso iterativo h_1 se convierte en una proto-IMF y se repite el proceso hasta que cumpla las condiciones para ser una IMF. Estas condiciones se denominan criterio de corte. Existen diversos criterios de corte, en este trabajo se adopta el definido por Huang et. al. (1998), el cual se basa en limitar la desviación estándar calculada para dos iteraciones sucesivas. Dicho parámetro se define como

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^{T} |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^{T} h_{k-1}^2(t)} \tag{2}$$

donde SD debe ser menor a un valor predeterminado. A fines prácticos, se define a su vez un número máximo de iteraciones. El proceso finaliza cuando se cumple uno de los dos criterios.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

La primera IMF debe contener la señal de menor período, es decir, la señal que contenga la energía de mayor frecuencia, como se observa en la Fig. 2. La IMF puede extraerse de la señal para obtener el residuo

$$r_1 = x(t) - c_1(t) \tag{3}$$

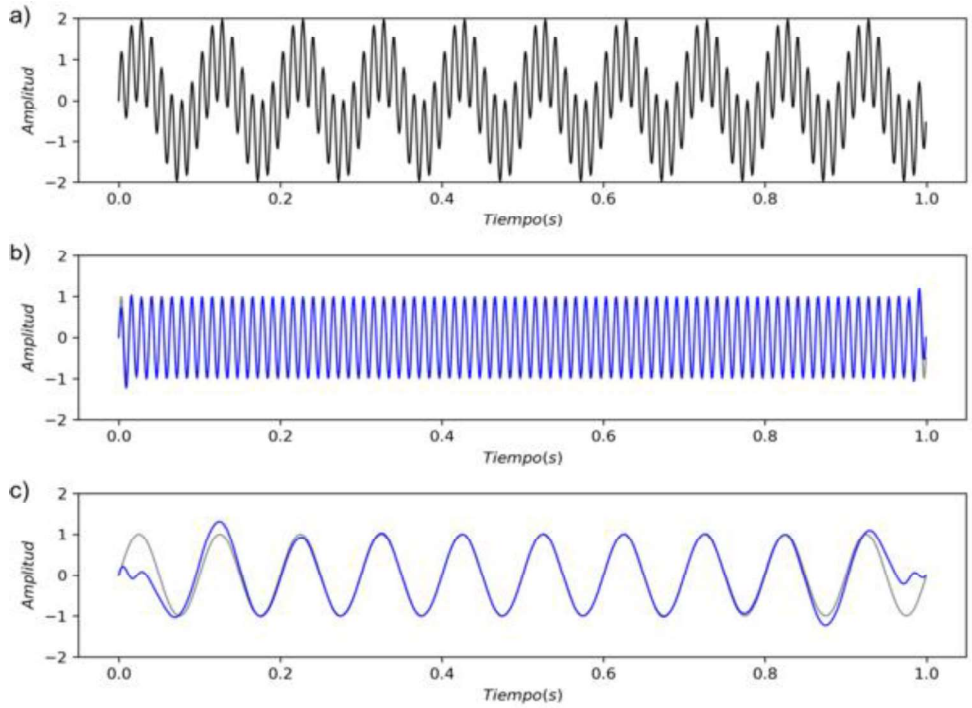


Figura 2. Descomposición de la señal en sus respectivas IMF. **a.** Señal original. **b.** En gris, la sinusoide de mayor frecuencia. En azul, la primer IMF. **c.** En gris, la sinusoide de menor frecuencia. En azul, la segunda IMF.

El residuo es tratado como nuevo dato y es sometido al mismo proceso iterativo para obtener una nueva IMF de menor frecuencia. El proceso puede repetirse para todos los residuos obteniendo

$$r_n(t) = r_{n-1}(t) - c_n(t) \tag{4}$$

La descomposición finaliza cuando el residuo se convierte en una función monótona o una función de un solo extremo, donde no se puede extraer una nueva IMF. Sumando se obtiene:

$$x(t) = \sum_{j=1}^{n} c_j(t) + r_n(t) \tag{5}$$

La señal de entrada se descompone en un número n de IMF y un residuo r_n, el cual puede ser una tendencia o una constante.

Analizamos ahora otro ejemplo interesante, en el cual una de las componentes de la señal está dada por una sinusoide de frecuencia no estacionaria. Utilizando EMD, se calculan

las dos primeras IMF con el objetivo de descomponer la señal. El resultado se encuentra en la Fig. 3.

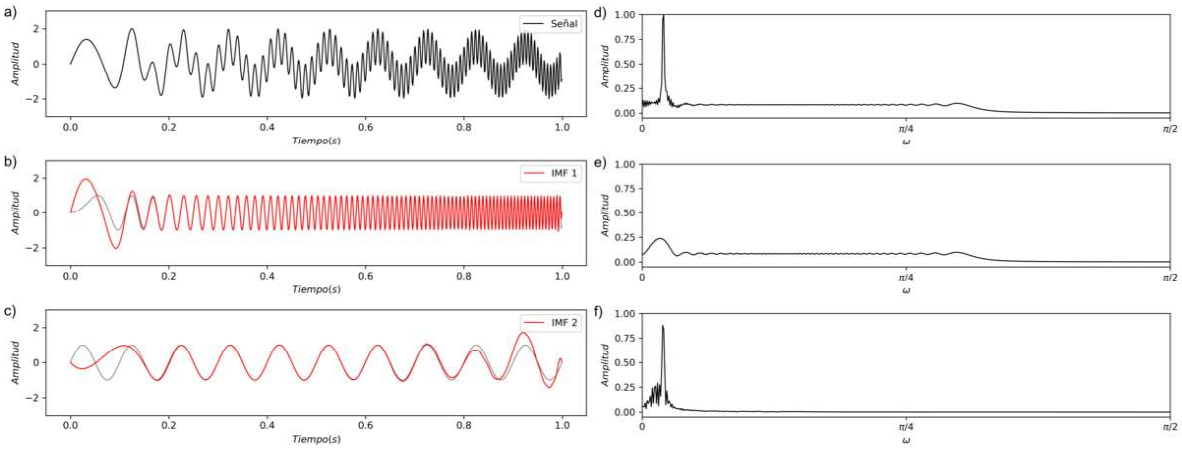


Figura 3. Primera columna: **a.** Señal de entrada. **b.** En rojo, la primera IMF. En gris, sinusoide no lineal. **c.** En rojo, segunda IMF. En gris, sinusoide lineal. Segunda columna: respectivos espectros de amplitud.

El método realiza la descomposición correctamente. Si se observan los espectros de amplitud, puede identificarse parte de la energía de la sinusoide de baja frecuencia se encuentra en la primera IMF, que debería contener la señal de mayor frecuencia. Este fenómeno se denomina mezcla de modos (*mode mixing)* y ocurre cuando una señal se divide en dos IMF diferentes (Huang, N y Wu, Z., 2008). El número necesario de IMF para descomponer una señal puede variar según la señal a analizar y el algoritmo implementado, superando la decena de IMF. Como se observa en la figura, las IMF contienen información con anchos de bandas decrecientes. Es decir, los modos de frecuencias mayores se encuentran en las primeras IMF y los de frecuencias menores en las últimas IMF. De acuerdo al objetivo de este trabajo, el cual es atenuar el ruido aleatorio de secciones sísmicas, solo se centra en las primeras IMF ya que son las que contienen la información del ruido aleatorio al igual que coherente.

ATENUACIÓN RUIDO ALEATORIO

El objetivo de este trabajo consiste en atenuar el ruido, tanto aleatorio como coherente, en registros sísmicos. Dicho proceso se realiza implementando EMD en el dominio f-x. Los registros sísmicos en dominio t-x pueden convertirse al dominio f-x mediante la transformada de Fourier. Según Canales, L. (1984), los eventos que se presentan lineales libres de ruido en el dominio t-x, se transforman en una suma de armónicos en el dominio f-x. Como en este trabajo se aplica EMD en el dominio f-x, se utilizan sinusoides a modo de ejemplo para analizar el comportamiento del método. Se suma ruido aleatorio gaussiano, empleando una distribución normal estándar $N(0,\sigma = 1)$. Se utiliza una amplitud tal que el ruido represente la mitad de la amplitud de la señal.

Utilizando EMD, se calcula la primera IMF y se la remueve de la señal, Fig. 4. Se observa como el método no altera la amplitud y la fase de la señal original. En cuanto al ruido, remueve las componentes de media y alta frecuencia, funcionando de manera similar a un filtro pasa bajas. Este método posee la ventaja que la frecuencia de corte se deriva automáticamente a partir del dato empleado.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

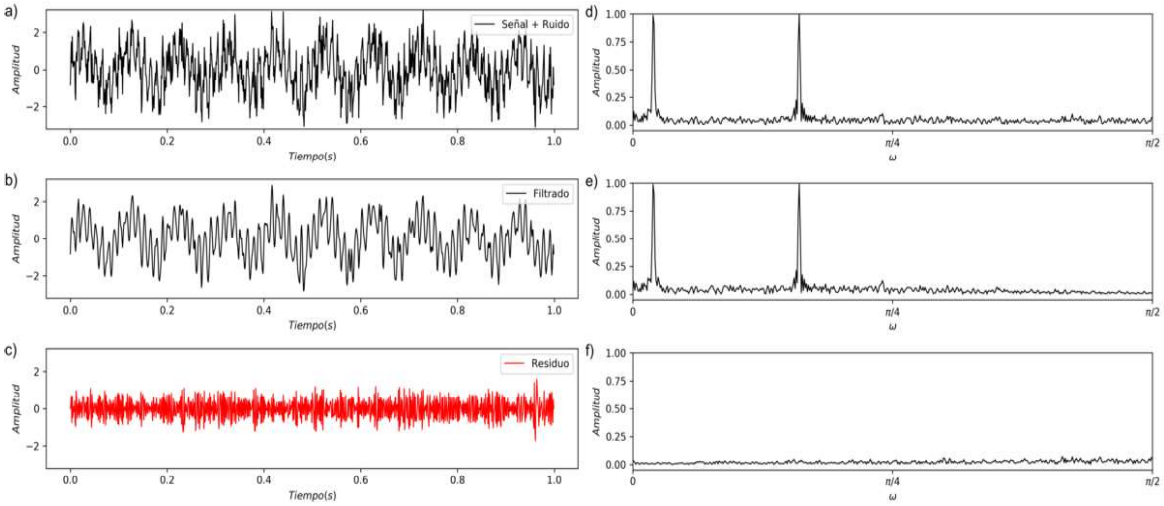


Figura 4. Primera columna: **a.** Señal de entrada. **b.** Señal filtrada. **c.** Primera IMF. Segunda columna: respectivos espectros de amplitud.

EMD EN EL DOMINIO F-X

El filtrado utilizando predicción espacial en el dominio f-x es un método efectivo para la atenuación de ruido aleatorio. El concepto, propuesto originalmente por Canales, L. (1984), utiliza la predictibilidad de la señal en la dirección espacial. Como afirma Canales, los eventos libres de ruido en el dominio t-x se manifiestan como una superposición de armónicos en el dominio f-x. Dichos armónicos se pueden predecir utilizando un filtro autorregresivo. Cuando el dato se encuentra contaminado con ruido aleatorio, la señal es considerada la parte del dato que puede predecir el filtro AR y el resto se lo considera ruido.

Sin embargo, los eventos sísmicos no siguen las hipótesis propuestas por Canales y presentan comportamientos tanto no lineales como no estacionarios. Las técnicas estándar de filtrado espacial afrontan estas condiciones dividiendo el dato en ventanas espaciales y filtrando cada una por separado. Este método requiere que el operador encuentre los parámetros óptimos, tanto de la longitud de la ventana como de la longitud del filtro a utilizar. La selección de dichos parámetros depende casi exclusivamente del dato que se presenta y, a su vez, varía para cada frecuencia. En este contexto, Bekara, M y van der Baan, M. (2009), proponen utilizar EMD en el dominio f-x para atenuar ruido en registros sísmicos.

En las secciones anteriores ya se ha expuesto y analizado el desarrollo de EMD aplicado en una dimensión. Ahora, se estudia como puede ser utilizado para atenuar el ruido en secciones sísmicas en dos dimensiones. En el dominio f-x, es posible aplicar EMD para cada frecuencia en la dirección del offset. Se puede identificar de manera sencilla que el ruido aleatorio representa las frecuencias altas en el dominio f-x. A su vez, la primera IMF contiene la información de mayor frecuencia tanto en la parte real como en la parte imaginaria. Por consecuencia, es viable atenuar el ruido aleatorio eliminando la primera IMF para cada frecuencia del dato en el dominio f-x.

Para procesar una sección sísmica en dos dimensiones, f-x EMD se emplea de manera similar a la deconvolución en el dominio f-x:

1. Se selecciona una ventana de tiempo y se transforma el dato al dominio f-x utilizando transformada discreta de Fourier en una dirección.
2. Para cada frecuencia:
    - Se separa la parte real de la imaginaria.
    - Se calcula la primera IMF y se la sustrae para obtener la parte real filtrada.
    - Se repite la misma operación para la parte imaginaria.
    - Se combinan las partes para obtener el dato complejo filtrado.
3. El dato se transforma al dominio original t-x.

El método f-x EMD adapta su manera de filtrar para cada frecuencia. Se debe destacar que eliminar solo la primera IMF es una posibilidad entre otras para filtrar el dato. Es el esquema más simple con el cual ya se pueden observar resultados positivos.

APLICACIÓN DE F-X EMD SOBRE SECCIONES SÍSMICAS SINTÉTICAS

Con el objetivo de analizar el comportamiento de f-x EMD sobre secciones sísmicas, se confeccionaron ejemplos sintéticos. Para ello se empleó un modelo convolucional con una ondícula de Ricker. Al registro sintético se le suma un ruido aleatorio gaussiano con una amplitud promedio que representa 0.4 de la amplitud máxima de la ondícula. En este caso, se aplica f-x EMD sobre la sección sintética que posee un reflector buzante. Se utiliza un parámetro de corte SD = 0.001 y un límite de 10 iteraciones. Dichos valores se eligen a través de prueba y error. Se calculan las dos primeras IMF y se las sustrae del dato sintético. Los resultados se muestran en la Fig. 5.
Las primeras IMF concentran el contenido de mayor frecuencia en el dominio f-x, como se aprecia en el panel inferior. Al volver al dominio t-x se encuentra una menor amplitud de ruido aleatorio, lo cual se distingue principalmente en las cercanías del reflector. A su vez, es importante destacar que no se detecta pérdida sustancial de la información del reflector, es decir, los armónicos correspondientes al reflector no se encuentran en las primeras IMF.

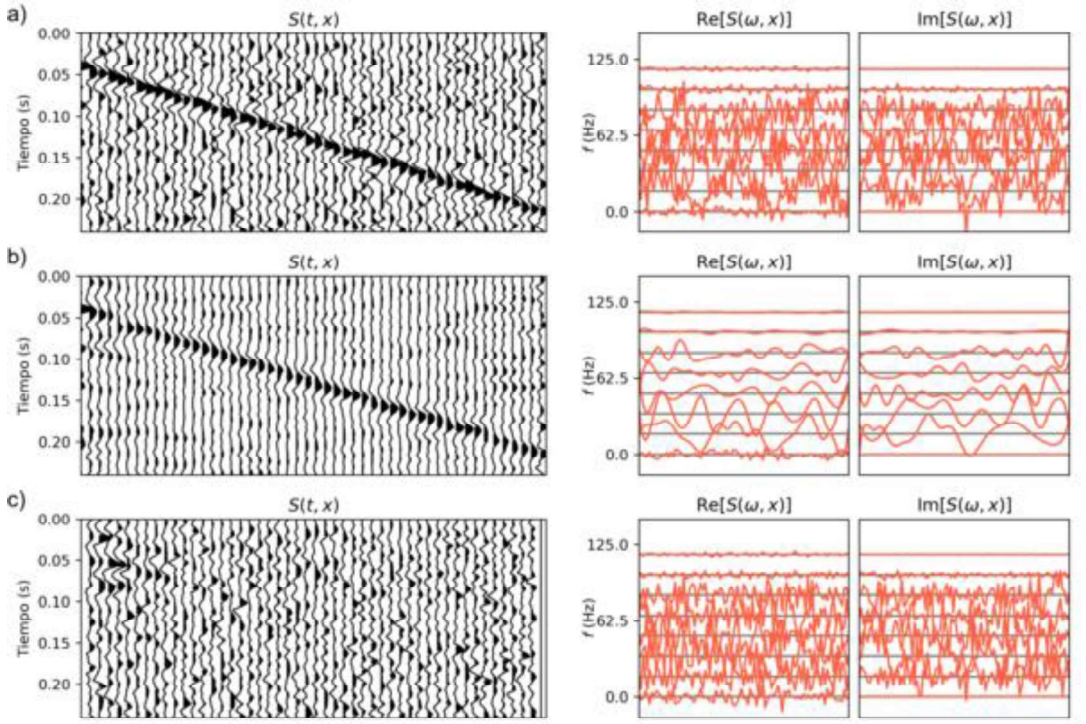


Figura 5. a. Reflector buzante contaminado con ruido aleatorio. **b.** Sección filtrada. **c.** Suma de las dos primeras IMF.

Con el propósito de contrastar los resultados obtenidos mediante el uso de f-x EMD, se procesan las secciones sísmicas utilizadas anteriormente con el método ampliamente difundido de la deconvolución f-x propuesto por Canales, L. (1984). En ambos casos se observa una disminución de la amplitud del ruido aleatorio presente en la sección. Para el caso de f-x decon es posible detectar parte de la información del reflector en el residuo, lo cual es un efecto no deseado. En cambio, f-x EMD no elimina información del reflector en el mismo grado que la deconvolución f-x.

APLICACIÓN DE F-X EMD SOBRE SÍSMICA DE CAMPO

Para evaluar los efectos de f-x EMD sobre un dato sísmico de campo se utiliza una sección 2D obtenida en Alaska (Geological Survey, 1981). El registro utilizado es de acceso público. La sección consta de 536 trazas y una duración de 6 segundos. El intervalo de muestreo es de 2ms. En la Fig. 6 se muestra una porción de la sección, la cual comprende entre 1.5 y 2.5 segundos de duración. En la figura es posible observar ruido aleatorio presente en toda la sección. A su vez, en la parte superior existen hipérbolas de reflexión que contaminan el dato. Además, próximo a los 2.2s hay un fuerte reflector con una discontinuidad que se reconoce fácilmente. Aplicamos f-x EMD eliminando las dos primeras IMF, empleando 10 iteraciones y un criterio de corte SD = 0.001. Al igual que en los ejemplos sintéticos, los parámetros se obtuvieron por inspección.

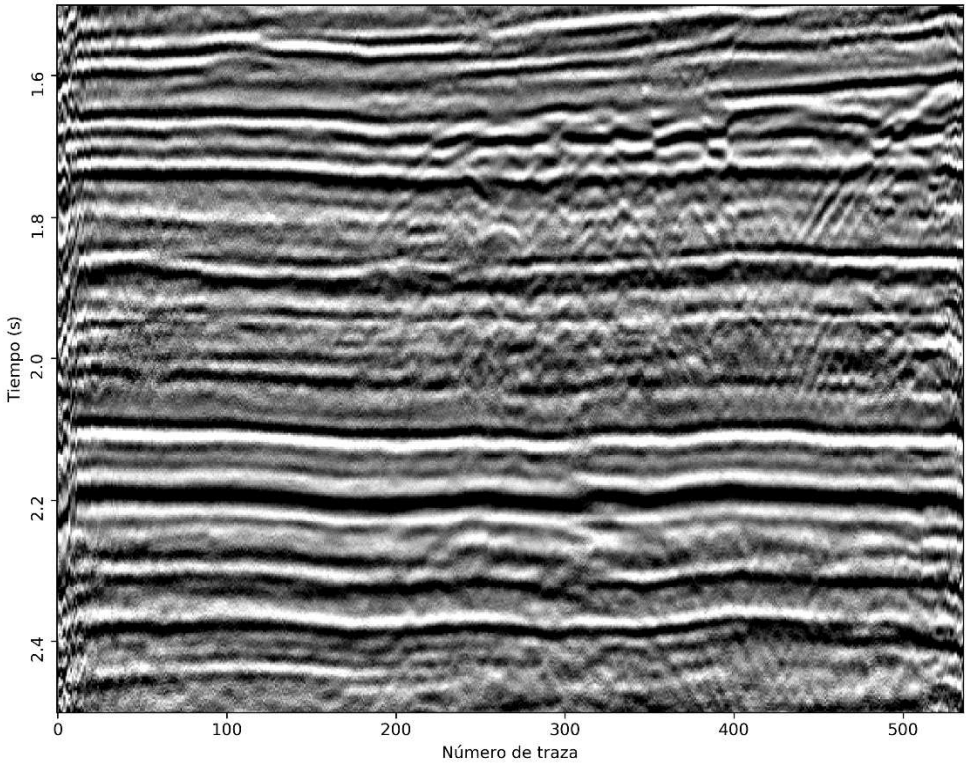


Figura 6. Sección sísmica de Alaska.

Al eliminar la primera IMF se observa atenuación del ruido aleatorio, mientras que el resto de la información presente en la sección no se altera de manera sustancial. Luego, al remover la segunda IMF, se identifica mayor atenuación del ruido aleatorio (Fig.7). A su vez, se observa que el ruido coherente presente principalmente en la parte superior de la sección se atenúa correctamente. En cuanto al reflector ubicado en la parte inferior, aún es posible identificar la discontinuidad, pero no se encuentra igualmente definida que en la sección original. Por lo cual, es posible pensar que parte de la información de la estructura se encuentra en la segunda IMF que fue eliminada.

Aparte de emplear f-x decon sobre los datos sintéticos, también se aplicó sobre el dato de campo de Alaska. Los resultados se encuentran en la Fig. 7. En general, f-x decon atenúa el ruido aleatorio a la vez que el ruido coherente. Sin embargo, la amplitud del ruido coherente eliminado es menor que la amplitud del ruido sustraído por f-x EMD, ya que todavía es visible en la sección filtrada utilizando f-x decon. Adicionalmente, en el residuo de f-x decon se encuentra información de las estructuras de la sección, caso que no sucede cuando se utiliza f-x EMD.

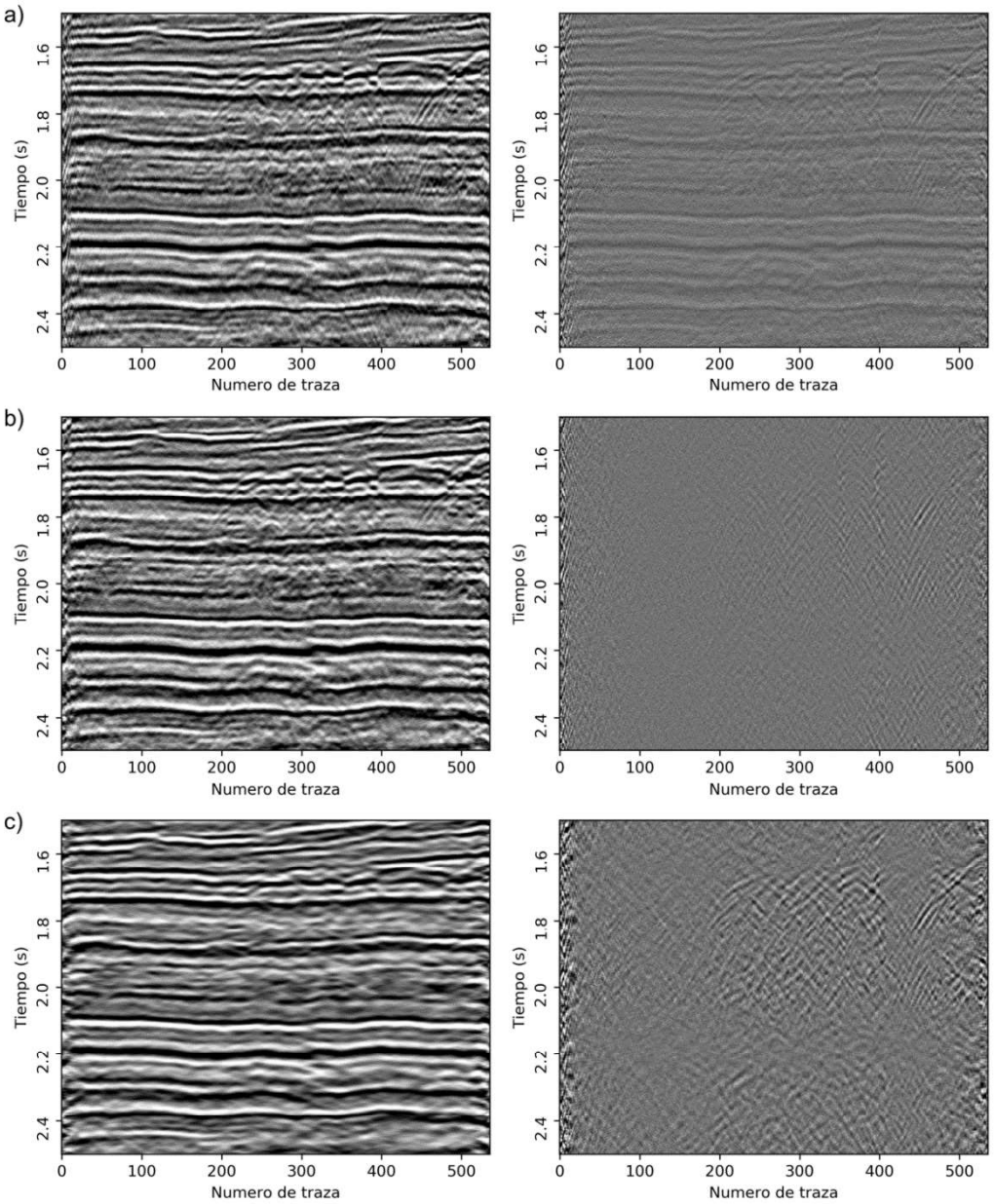


Figura 7. a. Primera fila. Sección filtrada y residuo utilizando deconvolución f-x. **b.** Segunda fila. Sección filtrada y residuo eliminando la primera IMF mediante f-x EMD. **c.** Tercera fila. Sección filtrada y residuo eliminando las dos primeras IMF mediante f-x EMD.

F-X EMD SOBRE VOLUMEN SÍSMICO 3D

Además de analizar el comportamiento de f-x EMD sobre secciones sísmicas tanto sintéticas como de campo, implementamos una estrategia para expandir f-x EMD con el propósito de atenuar el ruido en cubos sísmicos 3D. La estrategia consiste en procesar cada sección *inline* del dato y luego cada sección *crossline* del resultado con f-x EMD. Se utiliza esta estrategia sobre un volumen sintético contaminado con ruido aleatorio con áreas que contienen grandes buzamientos para evaluar el rendimiento del método en situaciones complejas. Para contrastar los resultados, a su vez se aplicó deconvolución f-x sobre el cubo sísmico.

Como se esperaba, los eventos plegados empeoran el funcionamiento tanto de f-x EMD como de la deconvolución f-x, resultando en pérdida de la señal. Repitiendo el procesamiento en el residuo y añadiéndolo al resultado previo reducimos notablemente

la pérdida de señal en f-x EMD. Sin embargo, no observamos dicho beneficio en escala similar usando esta técnica con la deconvolución f-x (Fig. 8).

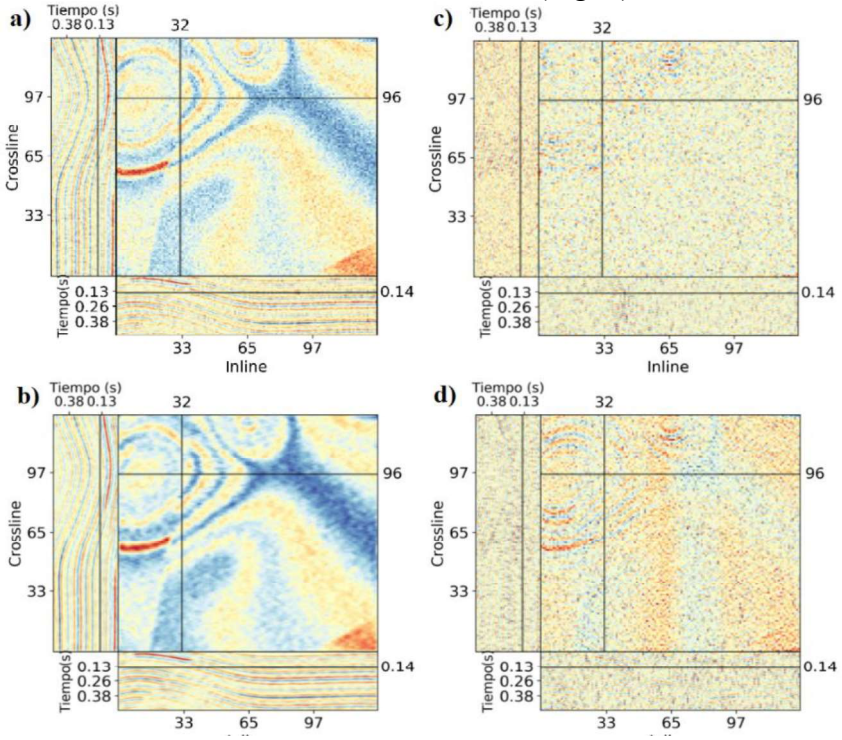


Figura 8. a. Volumen sintético contaminado con ruido aleatorio. **b.** Volumen filtrado mediante f-x EMD. **c.** Residuo utilizando f-x EMD. **d.** Residuo utilizando la deconvolución f-x.

DISCUSIÓN

A partir de analizar el funcionamiento de EMD, se describe su capacidad de descomponer señales tanto estacionarias como no estacionarias. Aplicamos EMD a señales sintéticas con el objetivo de atenuar ruido aleatorio. En los resultados hemos podido apreciar como el método se comporta como un filtro pasa bajas adaptativo al eliminar la primera IMF. A su vez, es posible eliminar dos o más IMF para atenuar ruido, pero se debe proceder con cautela ya que podría generarse una mezcla de modos y eliminar señal de interés cuando se realiza el filtrado. El número de IMF removidas depende del dato a analizar y se elige mediante inspección de los resultados.

Por otro lado, analizamos la atenuación de ruido en secciones sísmicas sintéticas aplicando EMD en el dominio f-x. Para cada frecuencia, se eliminan las primeras IMF en la dirección del offset y luego se regresa al dominio original. Contrastando los resultados con la deconvolución f-x, observamos como ambos métodos pueden atenuar el ruido aleatorio. No obstante, en la mayoría de los casos, las pérdidas de señal cuando se utiliza f-x EMD son menores a las obtenidas mediante la deconvolución f-x. Por último, se aplicó f-x EMD a una sección sísmica de campo. A diferencia de la deconvolución f-x, f-x EMD es capaz de atenuar tanto el ruido aleatorio como el coherente sin pérdida sustancial de la señal.

CONCLUSIONES

En este trabajo, hemos descrito e implementado el algoritmo descomposición en modos empíricos (EMD), el cual tiene la capacidad de dividir señales por medio de un banco de filtros adaptativos. EMD además se puede emplear como un filtro pasa bajas adaptativo, permitiendo atenuar componentes de alta frecuencia de la señal. A partir de los datos

sintéticos analizados se deduce que f-x EMD es capaz de atenuar ruido aleatorio de secciones sísmicas con pérdidas de señal mínimas comparado con la deconvolución f-x. El interés de aplicar f-x EMD con el fin de atenuar ruido en secciones sísmicas de campo radica en su capacidad de atenuar tanto ruido aleatorio como coherente. Como hemos demostrado con ejemplos sintéticos y datos reales, la cualidad de adaptarse automáticamente al dato de interés convierte a f-x EMD en una herramienta valiosa para la atenuación de ruido en registros sísmicos que presentan estructuras de media a alta complejidad.

REFERENCIAS

Battista, B. M., Knapp, C., McGee, T y Goebel, V. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data. *Geophysics*,**72**, H29-H37, 2007.

Bekara, M. y van der Baan, M. Random and coherent noise attenuation by empirical mode decomposition. *Geophysics*,**74**, V89-V98, 2009.

Canales, L. Random noise reduction. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 525-527, 1984.

Chen, Y. y Ma, J. Random noise attenuation by f-x empirical mode decomposition for denoising seismic data. *Geophysics*, **79**, V81-V91, 2014.

Gómez, J. L. y Velis, D. R. A simple method inspired by empirical mode decomposition for denoising seismic data. *Geophysics*,**81**, V403-V413, 2016.

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N-C., Tung, C. C. y Liu, H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, **454**, 903-995, 1998.

Huang, N. E. y Wu, Z. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. Reviews of *Geophysics*, **46**, 1-23, 2008.

USO DE MÉTODOS PIROMETALÚRGICOS PARA LA OBTENCIÓN DE RENIO Y MOLIBDENO

Ivana M. Orozco

Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional San Juan, ARGENTINA

e-mail: iorozco@unsj.edu.ar

RESUMEN

El renio es un metal cuya manufactura industrial se realiza mediante el uso de técnicas pirometalúrgicas. En este trabajo se estudió la obtención de renio y molibdeno a partir de minerales sulfurados de molibdeno, mediante el uso de tostación oxidante.
Los métodos convencionales de obtención de minerales sulfurados del renio y molibdeno, son a través de la tostación. Con la intención de enriquecer el grado de molibdenita la tostación se trabaja a temperaturas entre 500°C y 650°C, por encima de este rango de trabajo la muestra tostada comienza a sinterizarse. Actualmente, se obtiene el renio como un óxido de renio, que se encuentra en los polvos de los gases del proceso. Por otro lado, el molibdeno queda reteniendo en la calcita. Pero a temperaturas superiores a los 400°C, el renio volatiliza en forma de heptaóxido de renio (Re_2O_7), el cual abandona el horno de tostación de molibdenita, junto con los gases de chimenea.
Sin embargo, los estudios para la obtención de renio, se han realizado en forma limitada dado a la escasa concentración del metal en cuestión. Pero debido a la demanda actual tanto de renio como del molibdeno, han hecho que estos metales sean muy codiciados en el mercado metalífero. Esto conlleva a la importancia en el estudio y factibilidad de la recuperación de ambos. Se propone realizar un estudio en base al análisis teórico, donde se evalúan las variables típicas de este proceso tales como: temperatura (400°C y 700°C), tiempo (hasta 120 min de tostación) y pérdidas de masa del renio y molibdeno. La dependencia relativamente débil de la oxidación con la temperatura, puntualiza que el incremento de temperatura es el camino menos efectivo para aumentar el porcentaje de renio, pero si es el más efectivo para la obtención de molibdeno.

Palabras Clave: Molibdeno, Renio, Sulfuros.

INTRODUCCIÓN

Los procesos pirometalúrgicos son los métodos más antiguos y de aplicación más frecuentes para la extracción y purificación de metales. Son los procesos que utilizan una combinación de tostación, fusión, conversión refinación a fuego, refinación electrolítica y refinación química. La tostación, que es el primer proceso, se emplea para cambiar los compuestos metálicos a formas de tratamiento más fácil por las operaciones que siguen, así como también para remover algunas impurezas volátiles en la corriente de gas.

En la mayoría de los casos el concentrado metalífero no está en una forma química de la cual pueda separarse el metal fácilmente por medio de una reducción directa simple. Es necesario cambiarlo primero en algún otro compuesto que pueda tratarse con mayor facilidad. La tostación es un tratamiento químico preliminar que se emplea con mucha frecuencia, y que consiste específicamente en la oxidación de los sulfuros a óxidos, ya que muchos de los metales no ferrosos se presentan en forma de sulfuros.

La tostación oxidante de un sulfuro es una reacción exotérmica. Este calor de reacción ayuda a mantener al tostador a la temperatura de tostación requerida, con lo cual continua

el proceso con el poco calor extra aportado por la combustión de un combustible. En la primera etapa, se produce una pérdida de agua por vaporización hasta los 100°C aproximadamente, cerca de los 550°C se elimina el agua de hidratación, mientras que la disociación de carbonatos y sulfatos, así como la oxidación de los sulfuros, se realiza entre los 200°C y 700°C. Bajo 650°C el producto de la tostación de los sulfuros es principalmente sulfatos y sobre los 750°C casi exclusivamente óxidos. La cantidad de cada uno dependerá de las presiones parciales del SO_2 y O_2 dentro del horno, así como de la cinética de transformación respectiva. La tostación sobre 750°C se produce con gran velocidad. Entre 1000°C y 1300°C la cinética de oxidación es muy rápida y prácticamente completa, si las condiciones no son adecuadas, los sulfuros se funden y forman una masa compacta que no se oxida o lo hace difícilmente. Cabe destacar, que la tostación en su forma oxidante se utiliza para transformar los sulfuros metálicos en óxidos y/o sulfatos, por reacción con el oxígeno del aire a temperaturas entre 500°C y 900°C, (Warczoka et al, 2005).

Termodinámica de sistema Re – S – O para el proceso de tostación oxidante

En general, en el caso de la tostación oxidante, dependiendo de las condiciones en que se efectúe, se puede dejar inalterado el sulfuro o formar sulfatos, óxidos o el metal. Esto permite que los sulfuros de metales puedan ser separados por oxidación controlada formando sulfatos y óxidos, posteriormente son separados por fusión o lixiviación. Entonces para un sulfuro que se descompone en condiciones oxidantes, se obtiene un óxido según se observa en la ecuación química 1, es importante aclara que M representa a los metales en forma generalizada:

$$MS + 1{,}5O_{2\,(g)} \rightarrow MO + SO_{2(g)} \qquad (1)$$

Para el caso particular del renio, las reacciones químicas involucradas en el proceso de tostación oxidante para el mineral sulfurado de renio se muestran a continuación:

$$2ReS_2 + 7{,}5O_{2\,(g)} \rightarrow Re_2O_{7(g)} + 4SO_{2(g)} \qquad (2)$$

Durante todo el proceso de tostación para una determinada temperatura se obtiene una secuencia de reacciones bien marcadas, hasta alcanzar el máximo grado de oxidación del renio. Según la simulación de software (HSC 6.0) son reacciones exotérmicas. La secuencia de reacciones químicas que presentan mayor probabilidad a que ocurran, se detallan a continuación, reacciones químicas 3 a 7:

$$ReS_2 + 3O_{2(g)} \rightarrow ReO_2 + 2SO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_{(400\,^\circ C)} = -201{,}85 \text{ kcal} \qquad (3)$$

$$ReS_2 + 3{,}5O_{2(g)} \rightarrow ReO_3 + 2SO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_{(400\,^\circ C)} = -236{,}57 \text{ kcal} \qquad (4)$$

$$ReS_2 + 4O_{2(g)} \rightarrow ReO_4 + 2SO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_{(400\,^\circ C)} = -249{,}80 \text{ kcal} \qquad (5)$$

$$2ReS_2 + 7{,}5O_{2(g)} \rightarrow Re_2O_{7(g)} + 4SO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_{(400\,^\circ C)} = -476{,}55 \text{ kcal} \qquad (6)$$

$$ReS_2 + 2O_{2(g)} \rightarrow Re + 2SO_{2(g)} \qquad \Delta H^0_{(400\,^\circ C)} = -97{,}35 \text{ kcal} \qquad (7)$$

Como la termodinámica lo respalda, cada una de las ecuaciones químicas citadas, presenta determinadas energías de Gibbs. La energía libre de Gibbs de las reacciones anteriores se muestra en la Fig.1, como una función de la temperatura.

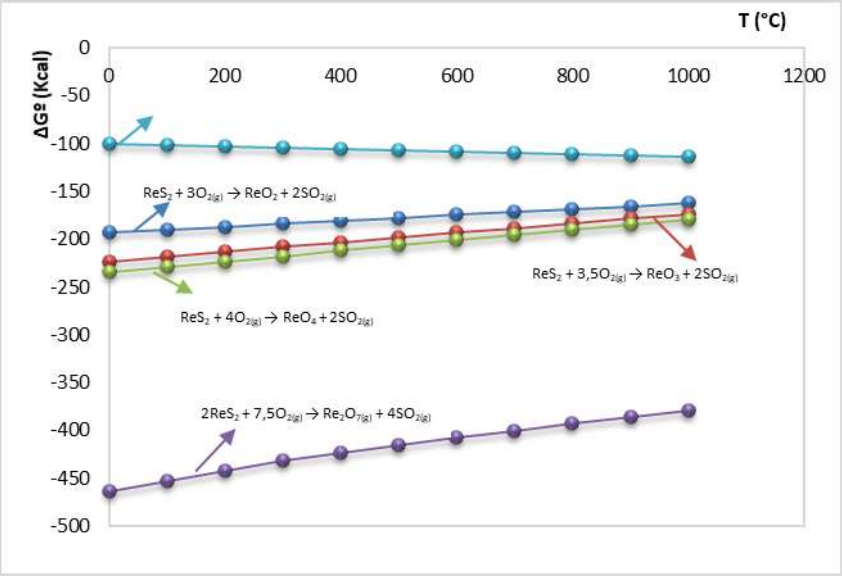


Figura 1. Energía libre de Gibbs de las reacciones versus temperatura para el renio.

El mecanismo mostrado en la ecuación 3 a 7 puede ser simplificado en las siguientes ecuaciones químicas 8 y 9:

$$ReS_2 \rightarrow ReO_2 \rightarrow ReO_3 \quad (8)$$

$$ReO_3 \rightarrow ReO_4 \rightarrow Re_2O_7 \rightarrow Re \quad (9)$$

Una justificación a lo visto anteriormente, se debe a la formación de compuestos en algunos casos no deseados acompañados de un desprendimiento de partículas en conjunto con el gas liberado disminuyendo de esta manera las concentraciones del elemento mencionado (Abisheva et al, 2011, Andreson et al, 2013).

Termodinámica de sistema Mo – S – O

Dado que el mineral mayoritario es la molibdenita se debe analizar su comportamiento. Donde la tostación de la molibdenita, conduce a la oxidación del sulfuro de molibdeno a trióxido de molibdeno, siendo la reacción fuertemente exotérmica. En presencia de sulfuro, toma lugar la reacción de retroceso y el trióxido de molibdeno se reduce a dióxido de molibdeno. Cuando la concentración de MoO_3 disminuye, el dióxido de molibdeno se oxida a trióxido. Según se muestra en las reacciones químicas de las ecuaciones 10, 11 y 12.

$$MoS_2 + 3{,}5O_2 \rightarrow MoO_3 + 2SO_2 \qquad \Delta H^o_{25°C} = -260 \text{ kcal/mol} \quad (10)$$

$$MoS_2 + 6MoO_3 \rightarrow 7MoO_2 + 2SO_2 \qquad \Delta H^o_{25°C} = 7{,}7 \text{ kcal/mol} \quad (11)$$

$$2MoO_2 + O_2 \rightarrow 2MoO_3 \qquad \Delta H^o_{25°C} = -38{,}2 \text{ kcal/mol} \quad (12)$$

La energía libre de las reacciones anteriores se muestra en la Figura 2 como una función de la temperatura.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

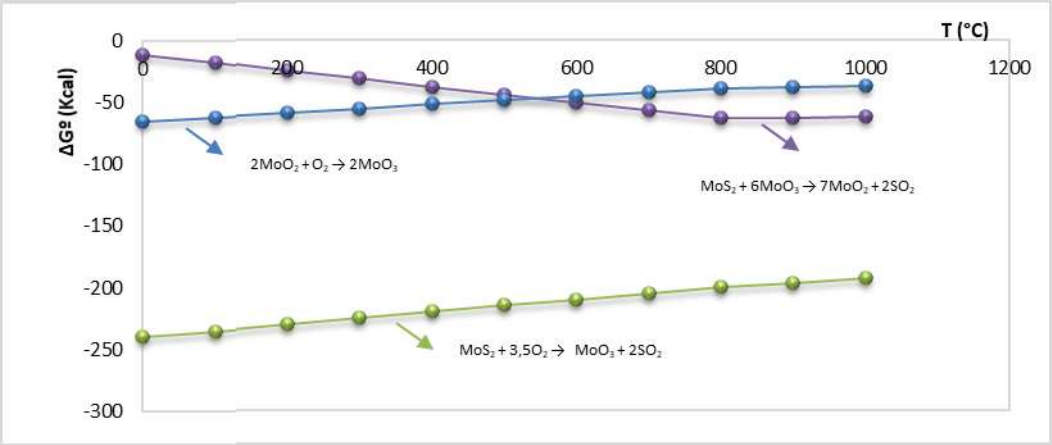


Figura 2. Energía libre de Gibbs de las reacciones versus temperatura para el molibdeno.

Para el caso del Mo, debido a que proviene de un mineral sulfurado MoS_2 al someterlo a un proceso de tostación se prevé la aparición de óxidos intermedios, lo que infiere un posible mecanismo de reacción para la atmósfera de trabajo. La aparición de óxidos intermedios se ve reflejada por las condiciones atmosféricas reinantes, es decir, bajas concentraciones de gases como el oxígeno (O_2) y altas en anhídrido sulfuroso (SO_2). También existe la posibilidad de formación de sulfatos de Mo, bajo determinadas condiciones atmosféricas de presión y temperatura y relación de gases que se producen durante la tostación. Más adelante se verá con más detalle la formación de cada compuesto mencionado. Se presenta en la Fig. 4 un diagrama considerando los posibles equilibrios entre los distintos compuestos de molibdeno: Mo-MoO_2, MoO_2-MoO_3, Mo-MoS_2, MoS_2-MoO_2 y MoS_2-MoO_3, (Najafabadi, et al, 2010).

Análisis Termodinámico de renio y molibdeno para la tostación oxidante

Durante la tostación del concentrado sulfurado como es el sulfuro de renio (ReS_2), conduce a la oxidación del sulfuro de renio a heptaóxido de renio (Re_2O_7), siendo la reacción fuertemente exotérmica y espontánea. Donde el heptaóxido de renio (Re_2O_7) es un compuesto muy volátil, que comienza a volatiliza a partir de los 350°C. Entonces la volatilización del renio ocurre principalmente hacia el final de la eliminación del azufre, y es paralela al inicio de formación de MoO_3, se forma sólo a temperaturas sobre 600°C.

El proceso de obtención de molibdeno conlleva a considerar que mientras se produce la tostación del mineral sulfurado de renio, no se debe dejar de lado el análisis termodinámico de formación del molibdeno. Por lo cual, durante el proceso de tostación, se prevé la aparición de óxidos intermedios, lo que infiere un posible mecanismo de reacción para la atmósfera de trabajo, como el que se muestra a continuación:

$$MoS_2 \rightarrow MoO_2 \rightarrow MoO_{2,75} \rightarrow MoO_{2,875} \rightarrow MoO_{2,889} \rightarrow MoO_3 \quad (13)$$

Investigaciones preliminares (Najafabadi, et al, 2010) muestran, que el principal óxido intermedio en la oxidación es el MoO_2. El mecanismo mostrado en la ecuación 13 puede ser simplificado a la siguiente ecuación 14:

$$MoS_2 \rightarrow MoO_2 \rightarrow MoO_3 \quad (14)$$

El MoO_3, debido a su alta presión de vapor, volatiliza fácilmente a las condiciones de tostación, la sublimación comienza aproximadamente a los 620°C para condiciones de presiones normales, haciendo necesario un control minucioso de la temperatura de tostación.

Resumiendo, las reacciones químicas que gobiernan el proceso de tostación oxidante para el renio y el molibdeno, son las ecuaciones que se detallan a continuación. Deben analizarse conjuntamente, dado que ambos productos se obtienen en forma paralela.

$$2ReS_2 + 7{,}5O_{2\,(g)} \rightarrow Re_2O_{7(g)} + 4SO_{2(g)} \quad (2)$$

$$MoS_2 + 3{,}5O_2 \rightarrow MoO_3 + 2SO_{2(g)} \quad (10)$$

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta etapa se propone realizar un estudio en base al análisis teórico expresado anteriormente, donde se evalúan las variables típicas de este proceso, tales como:

1. Temperatura
2. Tiempo
3. Pérdidas de masa

Con el fin de comprender mejor cada ensayo planteado se esquematiza en la Fig. 3 un Diagrama de flujo Nº 1, en el cual se detallan los mismos.

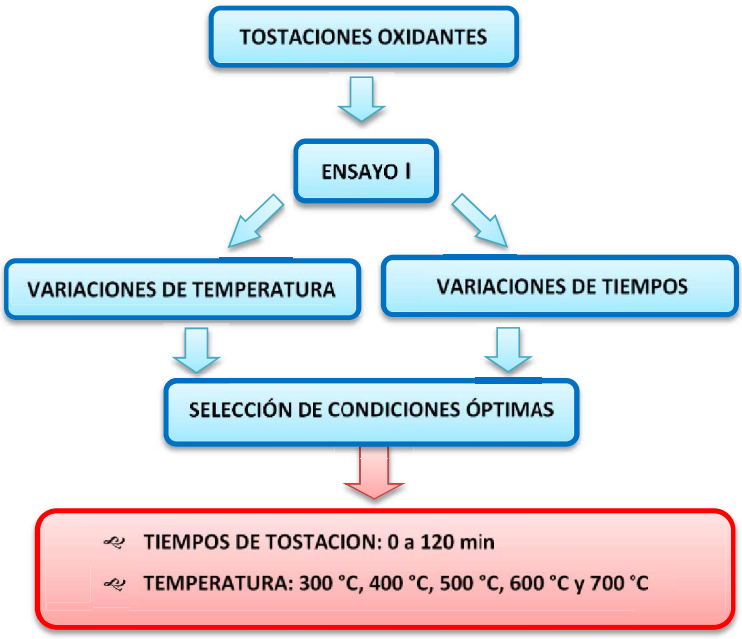


Figura 3. Diagrama de flujo Nº 12. Diseño experimental para muestras "M".

Preparación de muestras para ensayos de tostación oxidante

En la Fig. 4 se observa la muestra original sin tostar "M", mientras en la Fig. 5 la muestra después del ensayo de tostación. Puede percibirse la diferencia de color de la muestra antes y después del proceso de tostación. El color negro es característico de los sulfuros de molibdeno, cobre y hierro.

 ISBN: 978-987-1323-89-0



Figura 4. Muestra sin tostar



Figura 5. Muestra tostada a 400°C

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayo I - Variación de Temperatura en el tiempo

A continuación, se muestran las gráficas del comportamiento de la velocidad de oxidación para cada elemento en función de la temperatura. Los elementos estudiados son renio (Re), molibdeno (Mo); Fig. 6 hasta la Fig.7.

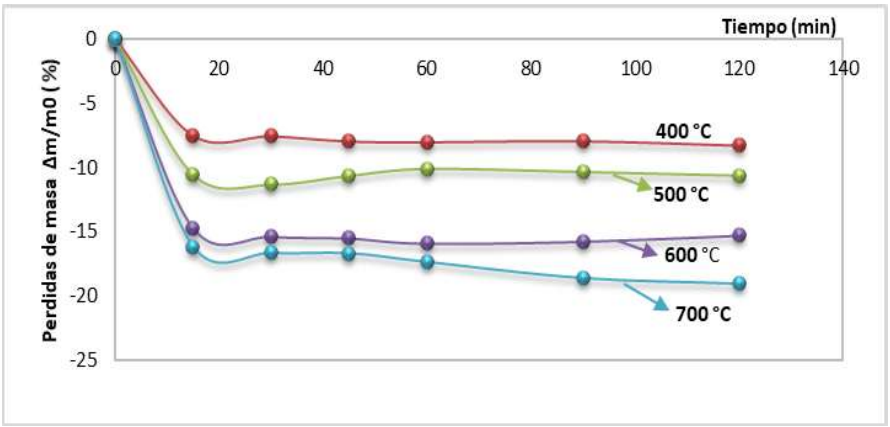


Figura 6. Pérdidas de masa del Re en función del tiempo a diferentes temperaturas.

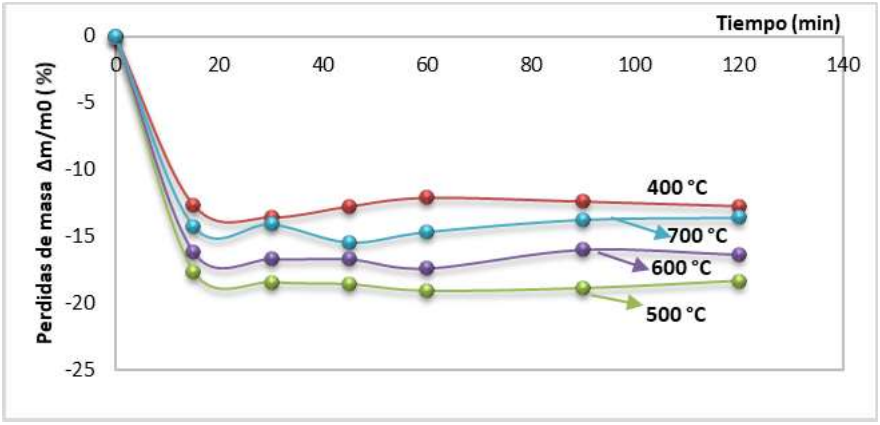


Figura 7. Pérdidas de masa del Mo en función del tiempo a diferentes temperaturas.

Los resultados indican una disminución de masa en un rango desde 0 hasta un 35% con respecto a la masa total, para las temperaturas de tostación comprendidas entre 400°C a 700°C y un tiempo de hasta 120 minutos. En el proceso se establecen una serie de etapas para cada una de las temperaturas evaluadas. Cada etapa se debe a la secuencia de reacciones químicas, ecuaciones químicas 3 a 7 para el renio y 10 a 12 para el molibdeno,

 ISBN: 978-987-1323-89-0

que provocan la formación de compuestos que presentan variaciones en sus pesos moleculares, como son sulfatos, óxidos, entre otros (Roger et al, 2009). A continuación, se detalla cada una de ellas:

1. Inicialmente el concentrado soporta la pérdida de agua por vaporización hasta los 100°C aproximadamente.
2. La disociación de carbonatos y sulfatos, así como la oxidación de los sulfuros, se realiza entre los 200°C y 700°C.
3. Para la temperatura de 400°C, se observa la menor pérdida de masa en el orden de 0,1 y 23% de masa total, a esta temperatura se elimina el agua de hidratación.
4. Para valores de 500°C a 600°C, es superior al 28% de pérdida de peso total, esto se debe a que comienza la descomposición del sulfuro y la formación de los óxidos metálicos.

Para explicar el comportamiento mencionado, se observa en el Diagrama de Estabilidad del Sistema Re-S-O a 400°C (Fig. 8), donde se detallan las fases de predominancia respectivas para el renio para la tostación oxidante, siendo las siguientes: $ReS_2/Re/ReO_2/ReO_3$ /ReO_4/Re_2O_7. La presencia de distintas fases, indica que no se trabajará en equilibrio termodinámico de fases (Najafabadi et al, 2010). También se observa como a medida que se modifican las presiones parciales dentro del horno de tostación se pueden obtener las diferentes fases de renio y se logra la conversión del sulfuro de renio hasta obtener la oxidación total bajo la forma de heptaóxido de renio (Re_2O_7), donde para esta fase especifica presenta un punto de sublimación de alrededor de los 450°C.

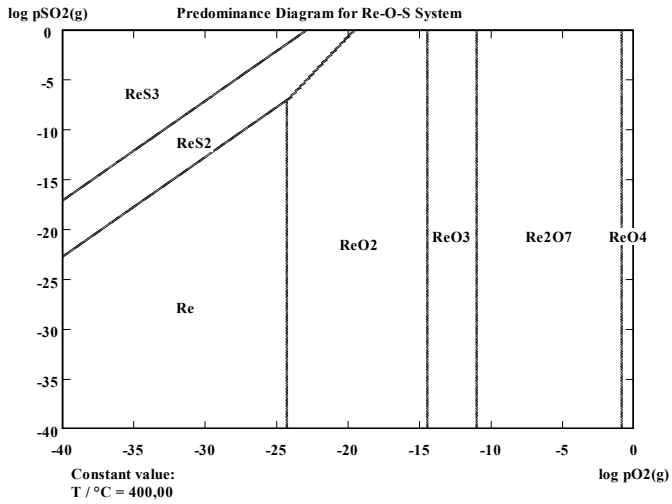


Figura 8. Diagrama de Estabilidad del Sistema Re-S-O a 400°C.

Analizándolo desde otro ángulo, en la Fig. 1 se detallan las Energía libre de Gibbs de las posibles reacciones químicas versus temperatura para el renio. Mostrando los valores y las espontaneidades del posible mecanismo de reacción para el renio, del mismo puede destacarse que la reacción química más espontánea es la formación del heptaóxido de renio Re_2O_7. De ello se infiere que al ser una reacción tan espontánea en comparación con el resto de los productos formados genera una sublimación del renio y escapa junto con los gases formados propios al proceso de tostación, siendo coincidente con el análisis abordado para las diferentes fases presentes en la Fig. 6.

De ambos diagramas (Fig. 8 y 1) se establece cómo debe trabajarse las muestras a valores de temperaturas inferiores a 450°C y superiores a 300°C, para el renio. La dependencia relativamente débil de la oxidación con la temperatura, puntualiza que el incremento de la temperatura es el camino menos efectivo para aumentar el porcentaje de renio. Conjuntamente esta oxidación debe hacerse sin llegar a sinterizar la calcita, lo cual destruiría el área máxima requerida en las partículas para el buen contacto con el aire. Esta respuesta se debe a que la tostación de sulfuro presenta un mecanismo de reacción que es representado por el caso del modelo de núcleo sin reaccionar esto significa que el modelo cinético supone que la reacción ocurre uniformemente dentro de la mezcla, entonces la velocidad global de reducción puede representarse por un modelo simplificado controlado por: reacción química.

Adicionalmente dado que el mineral mayoritario es la molibdenita entonces debe analizarse el comportamiento del molibdeno. Mostrando que un aumento de la temperatura de tostación afecta la sublimación del trióxido de molibdeno, esto se corrobora en la Fig. 9; con el diagrama de estabilidad de los sistemas MoS_2– MoO_3, donde se obtuvo el punto de fusión a 700ºC, esto da una pauta de la temperatura de trabajo a considerar. Dado que la presencia de tres fases sólidas (MoS_2, MoO_2 y MoO_3), indica las posibles fases que se encuentran en la calcita para las diferentes condiciones operacionales de tostación. De la Fig. 9, también se destaca que, para temperaturas inferiores a los 400°C, el sulfuro permanece inalterado, es decir, sin generación de nuevos compuestos característicos al proceso de tostación. A su vez, el aumento de temperatura (mayores a 700°C) provoca el comienzo de la sinterización (Juneja et al, 1996), generando que se encapsule el sulfuro de molibdeno, disminuyendo su oxidación y creando mayores problemas en la remoción final de azufre, que induce a una baja calidad del producto.

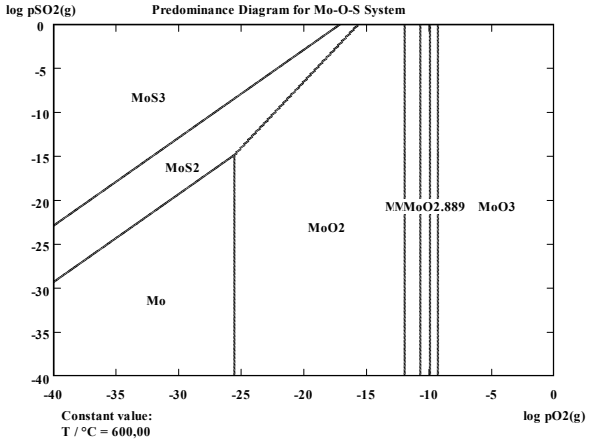


Figura 9. Diagrama de Estabilidad del Sistema Mo-S-O a 600°C

Los diversos usos que tiene el molibdeno exigen disponerlo en su forma oxidada. Se trata de un elemento que se contempla dentro de los microaleantes que desarrollan propiedades de endurecimiento en los aceros microaleados. Las adiciones se realizan en la acería a través de la incorporación de ferro molibdeno que es una ferroaleación que se obtiene generalmente por medio de la reducción aluminotérmica de ferro silicio y de óxido de molibdeno grado técnico. Después de la solidificación del metal se efectúan unas operaciones de molienda y de tamizado, obteniéndose de este modo el tamaño de partículas adecuado para incorporar al acero líquido. Razón por la cual su comercialización en el mercado de metales está basada en dicha forma. Esto explica la necesidad de someter a un proceso de oxidación, a prácticamente la totalidad de los concentrados de molibdenita producidos en el mundo, (Carten et al, 2009).

CONCLUSIONES

Del análisis termodinámico se determina que existe una dependencia relativamente débil de la oxidación con la temperatura y se puntualiza que el incremento de temperatura es el camino menos efectivo para aumentar el porcentaje de renio.

Se concluye que el comportamiento de las muestras para valores de temperaturas de tostación inferiores a 450°C y superiores a 300°C, alcanzan valores de 75,50% en la recuperación de renio. Se determina que para el molibdeno el aumento de la temperatura afecta la sublimación del trióxido de molibdeno, para temperaturas > 700°C. Para valores de temperaturas de tostación entre 300°C y 450°C, alcanzan valores de recuperación de molibdeno de 35,50%. Se considera que cuando comienza a formarse el óxido de molibdeno (MoO_3) en la calcita (a partir de los 500°C), el trióxido de renio (Re_2O_3) generado, inicia la sublimación. Este hecho, justifica el aumento considerable de la pérdida de masa en un 35%, con respecto a la masa total de la muestra. En base a esto se puede considerar que la temperatura óptima de tostación del concentrado es de 400°C.

Se ha comprobado que a temperaturas superiores a las de sublimación del renio (450°C), los gases formados escapan de la calcita, ellos son: anhídrido sulfuros (SO_2) y sulfúrico (SO_3), provocando una importante pérdida de masa (alcanzando valores del 35%), dado que también se generan diferentes compuestos como por ejemplo óxidos de renio y molibdeno. Esto constituye un factor relevante a considerar dentro de las fuentes de emisiones contaminantes hacia el medio ambiente que genera la tostación oxidante para el tratamiento de los concentrados.

Las tostaciones oxidantes indican una rápida disminución en los valores del porcentaje de azufre total, comenzando con valores del 35% y finalizando en un 2% para un tiempo de tostación de 10 minutos para 400 °C.

Se obtuvieron las condiciones óptimas operacionales de 400°C y 30 minutos para las cuales se obtienen los valores de recuperación de renio del 75,50% y para el molibdeno de un 35,50% de recuperación.

REFERENCIAS

Warczoka, P., Riveros, C., Utigard, F., Marin, T. Tesis: "Determinación de las condiciones de tostación de concentrados de molibdenita". *Grado Msc. Universidad de Concepción Chile,* 45-55 (2005).

Abisheva, Z.S., Zagorodnyaya ,A.N., y. Bekturganov, N.S. *Review of technologies for rhenium recovery from mineral raw materials in Kazakhstan*. Hydrometallurgy, 1-8, (2011).

Andreson, C.D, Taylor, P.R, y Andreson, C.G. *Extractive metallurgy of rhenium: a review: Minerals & metallurgical processing*, 59-73, (2013).

Najafabadi, S. G., Hasan, A. M., Saidi, A. *Thermodynamic investigation of lime-enhanced molybdenite reduction using methane-containing gases.* Thermochimica Acta 503–504, 46–54 (2010).

Roger J., Audubert F., Petitcorps Y. *Thermal reaction of SiC films with Mo, Re and Mo–Re alloy*, Journal of Alloys and Compounds, v. 475, n. 2, pp 635-642, (2009).

Juneja, J.M., Singh, S., Bose D.K. "Investigations on the extraction of molybdenum and rhenium values from low grade molybdenite concentrate", Hydrometallurgy, v. 41, n. 2, pp 201-209, (1996).

Carten, R.B., White, W.H., and Stein, H.J., *High-grade granite-related molybdenum systems—Classification and origin, in* Kirkham, R.V., Sinclair, W.D., Thorpe, R.I., and Duke, J.M., eds., Mineral deposit modeling: St. John's, Newfoundland, Canada, Geological Association of Canada, Dept. of Earth Sciences, Memorial University of Newfoundland Special Paper no. 40, p. 521–554 (1993).

HIDROGEOQUIMICA DEL ACUIFERO LIBRE Y SU RELACION CON LA GEOMORFOLOGÍA EN EL SECTOR REDUCCION - LAS ACEQUIAS, CÓRDOBA.

Lucia Palmero[a], Fátima Bécher Quinodóz[ab], Verónica Lutri[ab], Mónica Blarasin y Juan Felizzia[ac]

[a]*Departamento de Geología, FCEFQyN, Universidad Nacional de Río Cuarto, ARGENTINA.*
[b]*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnicas, CONICET.*

e-mail: lupalmeroo.15@gmail.com

RESUMEN

El área de estudio localizada en el sector de Reducción – Las Acequias, abarca las unidades geomorfológicas llanura eólica bien drenada, llanura fluvio eólica imperfectamente drenada y la faja fluvial del río Cuarto. La zona constituye el relleno de grandes depresiones tectónicas delimitadas por megaestructuras meridianas, segmentadas por otras transversales u oblicuas que generan bloques menores. Se trata principalmente de depósitos continentales, intercalados entre fluviales y eólicos dando lugar a geoformas características. Dada la complejidad de este ambiente y la importancia de contar con información científica sobre el funcionamiento del sistema hidrológico subterráneo para mejorar su gestión y manejo, se plantea como objetivo realizar la caracterización hidrogeoquímica del acuífero libre, estableciendo posibles relaciones con los principales rasgos geomorfológicos, utilizando análisis estadísticos multivariado para tratar de validar el modelo hidrogeológico conceptual. El acuífero libre presentó aguas dulces (0,5 a 1,5 g/L), de tipo geoquímico bicarbonatadas sódicas, destacándose una de las muestras (LB6) por ser salada y del tipo clorurada sódica, cuya salinidad, contenido en cloruros y nitratos la vincularían a procesos de contaminación puntual, la cual se condice con la actividad desarrolla en el sitio. El análisis estadístico en Modo Q presenta dos grupos: G_1, que asocia aguas dulces pertenecientes al ambiente fluvial del río Cuarto, con valores de salinidad inferiores a 1 g/L y G_2 que agrupa las aguas dulces con valores de salinidad > a 1 g/L del ambiente fluvio - eólico (G_{2a}) y eólico (G_{2b}), respectivamente. Esta subdivisión, se debe a su vez a los contenidos de As y F- presentes en las muestras.

Palabras clave*:* Aguas Subterráneas, Calidad, Geomorfología, Análisis Estadístico.

INTRODUCCIÓN

En diversos lugares del mundo, la disponibilidad y calidad del recurso hídrico superficial y subterráneo puede convertirse en un grave problema, sobre todo cuando la demanda de agua para diversos usos (humano, industrial, agropecuario, etc.) incrementa notoriamente. Numerosas zonas, con poblaciones que atraviesan por estas circunstancias, han sido sometidas en los últimos años a estudios hidrogeológicos para encontrar nuevas fuentes de agua potable (Blarasin et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2014). Casos particulares como los trabajos de Naik et al., (2007) y Rani et al., (2015), entre otros, plantean la búsqueda en sectores donde la frecuente escasez de agua es resultado de la combinación de la alteración en la estacionalidad de las lluvias, intrusión de agua salada y/o la contaminación procedente de aguas residuales y sistemas de drenaje deficientes. En la exploración hidrogeológica es de suma utilidad el estudio de las geoformas del paisaje, vinculándolas con las zonas de escorrentía/recarga. Esto ha permitido, por ejemplo, encontrar sectores de recarga de agua subterránea, no afectados por procesos de contaminación y aptas para diversos usos, incluso humanos (Rani et al.,

2015, Blarasin et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2014). Sedhuraman et al., (2014), Alvarez et al., (2010) y Ramaiah et al., (2012) reconocen la importancia de la geomorfología como condicionante del agua subterránea y definen potencialidad y características de diferentes zonas sobre la base de unidades geomorfológicas. En el caso del Sur de Córdoba, el recurso hídrico más utilizado para todas las actividades es el agua subterránea, en particular la del acuífero libre. Sin embargo, en numerosas ocasiones, presenta escasa aptitud como resultado del impacto de las actividades humanas o por la presencia de altos valores de iones disueltos que forman parte del fondo natural de la composición química del agua, como por ejemplo arsénico y flúor, entre otros (Bécher Quinodóz y Blarasin, 2015, Blarasin et al., 2014, Bécher Quinodóz y Blarasin, 2014, Bécher Quinodóz et al., 2014, Bécher Quinodóz et al., 2013). Las poblaciones rurales y urbanas requieren entonces de estudios hidrogeológicos específicos que permitan a través de exploraciones, definir cambios espacio-temporales y encontrar y cuantificar reservas de aguas dulces aptas, de manera de disminuir la amenaza que constituyen a la salud pública las aguas de mala calidad. En función de los antecedentes regionales y locales mencionados, resulta necesario conocer los condicionamientos geomorfológicos sobre la geoquímica del agua. En este marco, y dada la importancia de contar con información científica sobre el funcionamiento del sistema hidrológico subterráneo para mejorar su gestión y manejo, se plantea como objetivo realizar la caracterización hidrogeoquímica del acuífero libre en la planicie fluvio eólica del sector Reducción – Las Acequias (ver Fig. 1), estableciendo posibles relaciones con los principales rasgos geomorfológicos, utilizando análisis estadísticos multivariado para tratar de validar el modelo hidrogeológico conceptual.

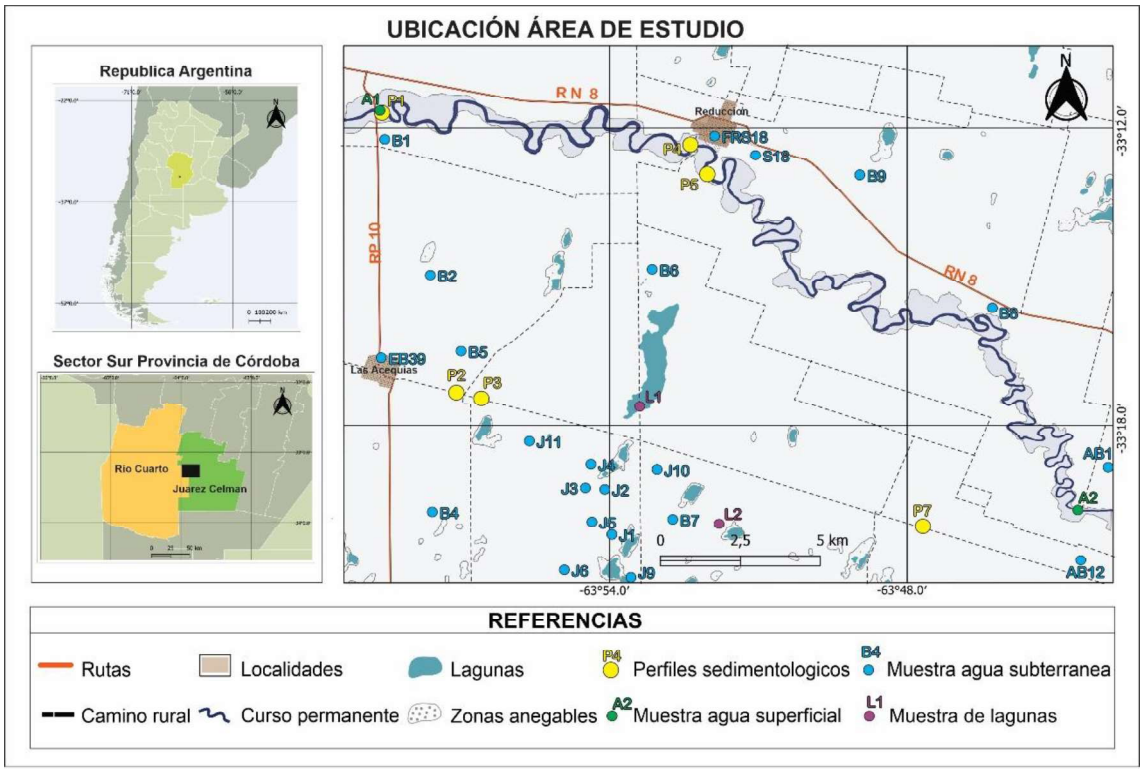


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron antecedentes del área y tema a investigar, disponiéndose de hojas topográficas (1:50.000) del Instituto Geográfico Nacional. Se conto con información

perteneciente a 3 estaciones meteorológicas de particulares y entes oficiales, como así también con datos del modelo climático generado por la Climatic Unit Research (CRU), de la Universidad de Anglia (serie 1901 – 2019). Se efectuó el estudio geológico - geomorfológico, a través de la descripción de perfiles litológicos aflorantes y procedentes de perforaciones, efectuándose en ambos casos la recolección de muestras de sedimentos para posterior análisis textural (tamices ASTM, escala Udden - Wendworth), obteniéndose los histogramas con los porcentajes de las distintas fracciones granulométricas. Para el estudio hidrogeológico se realizó el muestreo de agua subterránea en 31 perforaciones que captan de los primeros 10 - 20 m del acuífero libre y se aforaron/ muestrearon secciones de interés del río Cuarto. En la toma de muestras de agua subterránea en cada perforación, se garantizó la renovación del agua de la captación dejando fluir un mínimo de 3 volúmenes de pozo (Vázquez-Suñé, 2009), controlando además la temperatura del agua hasta su estabilización. Luego, el recipiente de muestreo fue enjuagado 2 veces con el agua de la perforación y llenado por completo. La toma de muestra de agua superficial se realizo en tres secciones del río del Cuarto (ingreso, tramo medio y salida del área de trabajo), para lo cual se tuvo en cuenta la profundidad de muestreo, distancia de la margen y centro del cauce, al mismo tiempo que se enjuago tres veces el recipiente con la muestra a tomar. Se midieron in situ pH, temperatura y conductividad eléctrica (CE), con sonda multiparamétrica Hanna (HI 98127). Los análisis físico-químicos de las muestras, siguiendo Standard Methods (APHA-AWWA-WEF, 2005), fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología (UNRC). Se corroboraron los datos obtenidos en el campo respecto a CE y pH (con electrodo Orion), y se midieron: carbonatos (CO_3^{-2}) y bicarbonatos (HCO_3^-), mediante titulación potenciométrica con electrodo selectivo Orion - Thermo; sulfatos (SO_4^{-2}) por turbidimetría (con centrífuga Macrotronic); cloruros (Cl^-) mediante titulación colorimétrica con nitrato de plata, calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) por titulación colorimétrica con EDTA; sodio (Na^+) y potasio (K^+) por fotometría de llama (fotómetro digital Metrolab 315). Finalmente, se efectuó el análisis de la información hidrogeoquímica obtenida durante las etapas de campo y laboratorio para el acuífero libre. Las muestras fueron clasificadas geoquímicamente en función de los iones dominantes (Custodio, 1993), elaborándose mapas de distribución areal de CE e hidroquímicos de interés (diagramas de Stiff). La información resultante de los antecedentes hidrogeológicos y los obtenidos en la caracterización hidrogeoquímica, permitió elaborar el modelo hidrogeológico conceptual. Para validar dicho modelo se realizaron análisis estadísticos inferenciales y descriptivos uni y multivariados utilizando el software SPSS (V.21). Se calcularon los estadísticos descriptivos más importantes (media, desviación estándar, mediana, asimetría, máximos y mínimos) para las variables físicas y químicas analizadas, se elaboraron diagramas de caja ("box plot") de manera de evaluar las variaciones de calidad observadas entre los sistemas superficial/subterráneo con las unidades geomorfológicas. El análisis estadístico multivariado se realizó mediante el tratamiento de agrupamiento cluster entre variables (modo R) y observaciones (modo Q), para lo cual los datos fueron estandarizados (debido a que las unidades de medida de las variables consideradas son diferentes).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El clima de la zona de estudio es de tipo *mesotermal subhúmedo seco,* con nulo o pequeño exceso de agua y déficit. La precipitación (P) media anual para el periodo 1901 – 2019 correspondiente a la serie Estación Climatic Unit Research (CRU) es de 797 mm (ver Fig. 2) y la evapotranspiración potencial (ETP) media anual es de 855 mm, mientras que la

evapotranspiración real (ETR) media anual resulto en 797 mm (coincidente con toda el agua caída), lo que produce un déficit hídrico del orden de 58 mm y ausencia de excesos hídricos en todo el año. Las precipitaciones se concentran desde octubre a abril, registrándose los mayores valores en diciembre (119,3 mm) y marzo (113,3 mm). El mes de junio es el que menos precipitaciones presenta, con una media de 14,8 mm. El balance hídrico seriado de paso mensual muestra que la serie presenta en general un gran déficit hídrico para todo el período (1901-2019), concentrándose en los meses de primavera y comienzos del verano. Cuando se registran excesos éstos suelen ser escasos y se localizan principalmente en los meses de otoño, aunque se registran algunos veranos con excesos, cuando los meses de primavera son muy lluviosos. Los máximos déficits hídricos se reconocen en el período 1902 - 1972, aunque existen años con excesos dentro de este periodo. Los excesos aumentan desde la década del ´70, coincidiendo los períodos con más disponibilidad de agua (78-80, 83-85, 99-01, 04 y 07) con importantes crecientes de ríos y arroyos y aumentos significativos del nivel freático. Este comportamiento fue generalizado a todo el Sur provincial (Blarasin et al., 2005, Blarasin et al., 2014) y en la zona se ha manifestado a partir del aumento de los cuerpos lagunares y superficies de bañados, aumento de reservas subterráneas y desbordes de ríos y arroyos.

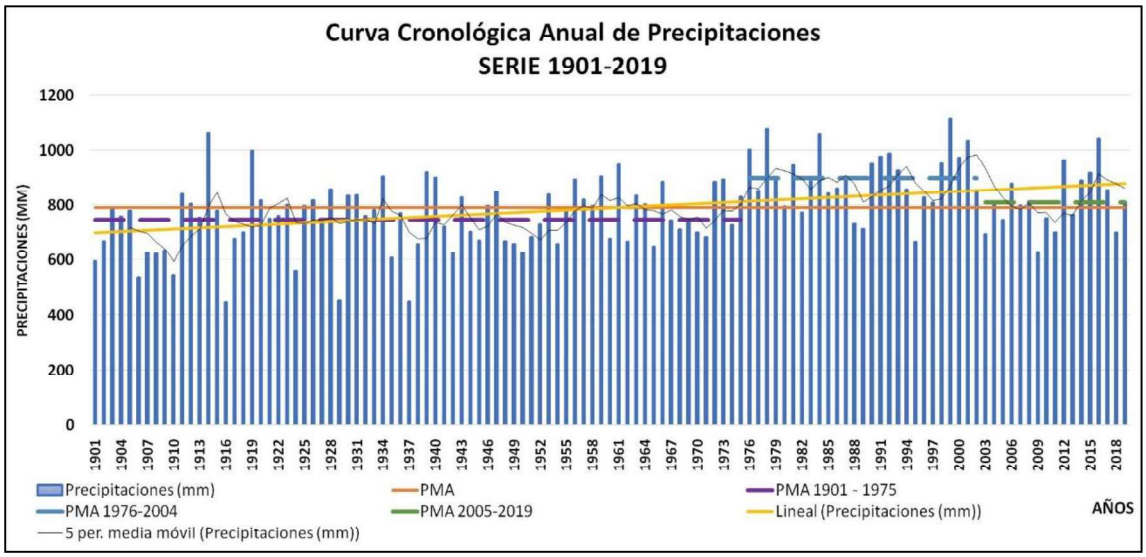


Figura 2. Curva cronológica anual de precipitaciones para la serie 1901– 2019.

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA-LITOLÓGICA

La zona de estudio se ubica en la provincia geológica Llanura Chaco Pampeana, dentro de la unidad geomorfológica denominada Llanura fuvioeólica imperfectamente drenada. Esta unidad constituye el relleno de grandes depresiones tectónicas delimitadas por megaestructuras meridianas (fallas Pampayasta - Alejandro Roca, Tostado, Tigre Muerto, entre otras) y segmentadas por otras transversales u oblicuas que generan bloques menores. Se trata principalmente de depósitos continentales, intercalados entre fluviales y eólicos dando lugar a geoformas características de estos ambientes. El área presenta un relieve suave a moderadamente ondulado con pendiente general al SE inferior al 0,5% pero en sectores medanosos puede llegar al 3%. Se encuentra disectada por un curso fluvial permanente de gran jerarquía, correspondiente al río Cuarto con una orientación NO-SE preferentemente, el cual posee una faja fluvial que se reconoce desde la salida de las sierras de Comenchingones, pero adquiriendo mayor relevancia en cuenca media. Su morfología se ve afectada en cuenca media por la falla Río Cuarto y en la zona de estudio por la falla Pampayasta - Alejandro Roca. La morfodinámica del rio Cuarto ha

evolucionado en el tiempo y deja como evidencia paleocanales y distintos procesos de migración y acortamiento del canal, como neck cut-off y chute cut-off. Los meandros abandonados conforman micro áreas inundadas adyacentes al río y en algunos casos se han colmatado. El canal se caracteriza por estar incidido en los sedimentos cuaternarios, dejando llanuras aluviales desactivadas y sobreelevadas respecto al cauce actual. Se destaca la presencia de lagunas eólicas en sectores de médanos constituidos por arenas muy finas, donde sus cubetas de deflación dan lugar a la formación de estas.

En el área se identificaron tres grandes ambientes geomorfológicos (ver Fig. 3): I: Llanura Eólica bien drenada; II: Llanura Fluvio-Eólica; y III: Llanura Fluvial del río Cuarto. Dentro de la unidad I se identifica la Planicie loessoide con dunas longitudinales, que se divide en I.1.a Planicie Intermedia y I.1.b Alto estructural de Levalle. La segunda unidad, se subdivide en II.2 Llanura bien drenada y II.2 Llanura imperfectamente drenada, mientras que, la tercera unidad está representada por III.1 Faja fluvial actual y III.3 Antigua faja fluvial. En el área de estudio no aflora basamento cristalino y las unidades litoestratigráficas reconocidas son sedimentos cuaternarios, los cuales corresponden a Arenas eólicas, sedimentos limosos con CO_3Ca y niveles de calcretos discontinuos pertenecientes a la Fm. Pampiano y gravas, arenas y limos fluviales de la Fm. Rio Cuarto, Las Lajas y Reducción. A partir de perfiles aflorantes realizados, se observó que comparten en común la asociación litológica de materiales limosos a arenosos y que son carentes de estructuras sedimentarias en su mayoría. Los perfiles que se encuentran dentro de la planicie eólica son dominados por materiales loéssicos mientras los que se ubican en la faja fluvial, presentan intercalación de limos y arenas finas a gruesas, con niveles reductores y oxidantes.

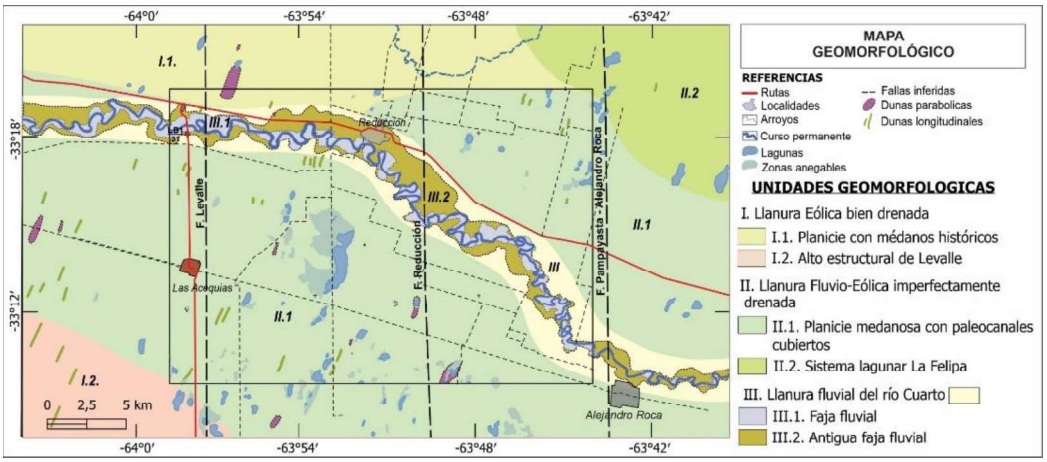


Figura 3. Mapa geomorfológico Sector Las Acequias – Reducción.

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

El acuífero libre está compuesto principalmente por sedimentos finos de origen eólico (arenas muy finas limosas y limos arenosos) con intercalación de sedimentos gruesos fluviales (arenas y gravas). Estos últimos se encuentran en profundidad y están relacionados a paleocauces. En cuanto a la dinámica del agua subterránea se observa que el sector estudiado presenta una morfología plana a suavemente ondulada, con dirección principal del flujo NO-SE (ver Fig. 4). Los gradientes hidráulicos calculados son muy bajos, van entre 0,003 y 0,005. A partir de ensayos de bombeo realizados en sectores próximos a la localidad de Las Acequias, se pudo asignar a las arenas muy finas, un valor de permeabilidad entre 2 m/día a 3 m/día (Fuente: Juan Felizzia Perforaciones). La profundidad del acuífero libre es variable (ver Fig. 5), encontrándose los menores valores

de ZNS, en la parte SO del área de estudio, donde coincide con la mayor acumulación de zonas anegables, mientras que las profundidades del nivel freático cercanas al río van de 0 - 14m. La variación del nivel freático está directamente relacionada con las precipitaciones, dependiendo de las estaciones del año varía entre 0,5 – 1,00m anualmente. El aumento gradual hacia el SE de la ZNS, puede llegar a estar influenciado por las fallas Reducción y Pampayasta-Alejandro Roca.

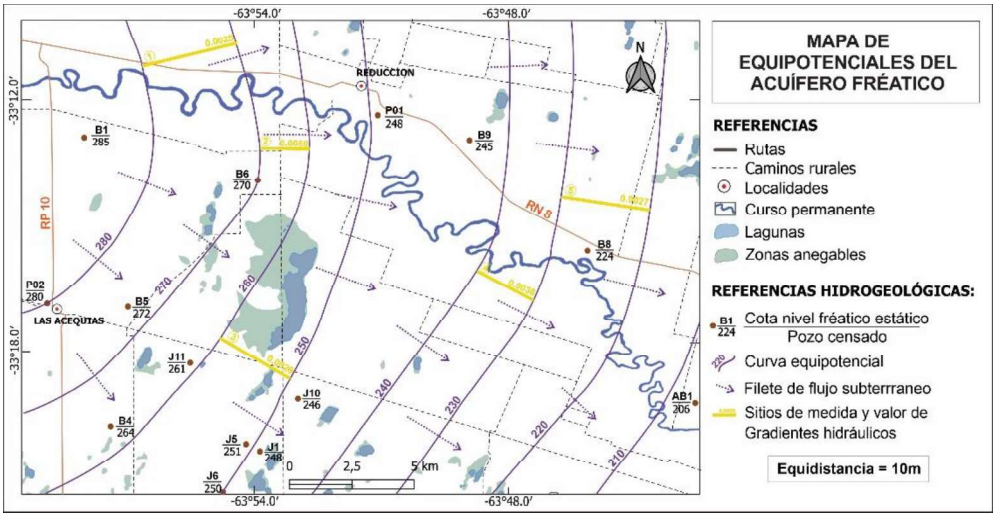


Figura 4. Mapa de potencial hidráulico del acuífero libre.

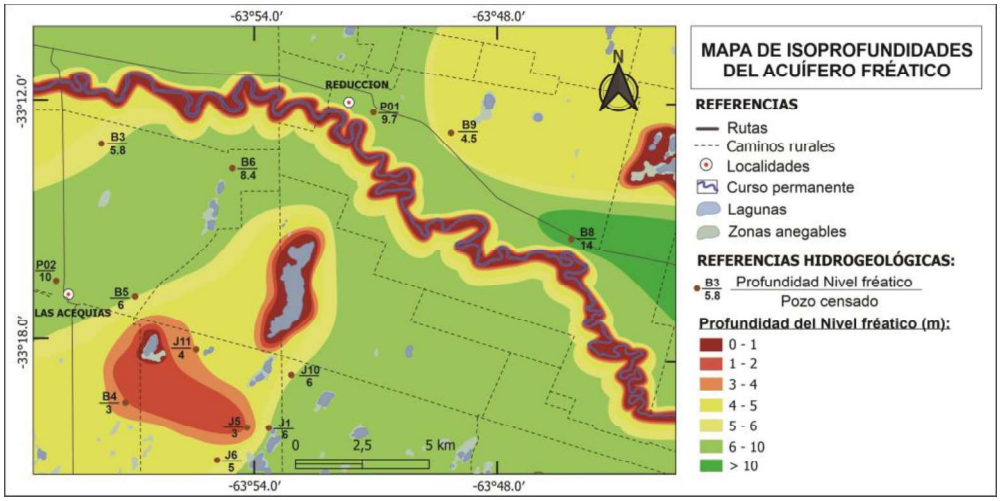


Figura 5. Mapa de isoprofundidades del acuífero libre.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

El agua subterránea se caracteriza por presentar valores de conductividad eléctrica entre 782 - 2210 µS/cm, pero se destaca un valor anómalo que corresponde a la muestra LB6, donde su alto valor de CE (5910 µS/cm) y elevados Cl^- (357 mg/L) y NO_3 (850 mg/L), se asocian a la presencia de un sitio de contaminación puntual por vertido de desechos de bidones de agroquímicos al lado de la perforación (donde los fertilizantes con N pueden generar este tipo de contaminación puntual y al oxidarse dar lugar a valores elevados de nitrato). Los valores de conductividad eléctrica están directamente relacionados con las SDT, por lo que se puede observar que los valores más bajos de salinidad se encuentran en la unidad geomorfológica I.1 Planicie loessoide con dunas longitudinales, más

específicamente en el Alto estructural de Levalle y al norte del río Cuarto. Sin embargo, se puede destacar una tendencia creciente en dirección NO-SE, encontrándose los mayores valores en el sector inferior derecho de la zona de estudio, el cual corresponde a la unidad II. Llanura fuvioeólica (ver Fig. 6).

Todas las muestras (exceptuando LB6) se clasifican como aguas dulces por poseer < 2000 mg/L de sales disueltas y a partir del diagrama de Piper Hill realizado se observa que las muestras de agua del acuífero libre corresponden a aguas de tipo geoquímico bicarbonatadas sódicas. El 87.5% de las muestras corresponde a aguas blandas y el restante a aguas muy duras, por lo que predominan aguas con baja dureza. En toda la zona de estudio se detectó alto contenido de As y F, con valores que van de 10 a 468 ug/L y 0,21 a 4,1 mg/L respectivamente. La elevada presencia de estos elementos estaría vinculada a la meteorización del vidrio volcánico (Nicolli et al. 1997), componente principal de los materiales eólicos de la región (Blarasin, 1984, Giuliano Albo, 2013) o desorción a partir de los óxidos de hierro (Smedley et al., 2000), también constituyentes de estos sedimentos.

Por otra parte, el río Cuarto, en el área de estudio presenta CE entre los valores 235 – 429 µS/cm, ubicándose el menor valor en cercanías de la localidad de Reducción. Son aguas de carácter geoquímico del tipo bicarbonatadas sódicas y dulces. En cuanto a los cuerpos lagunares (L1 y L2), estos presentan altos valores de CE y por lo tanto de salinidad (5929 y 2639 mg/L respectivamente), esto puede originarse por recibir aporte de acuíferos con flujos más profundos y mayor salinidad que descargan en esta zona deprimida, y además verse incrementados los procesos de evaporación que concentran las sales, aumentando la conductividad, o bien, por la llegada de contaminantes aportados por la actividad agrícola ganadera y movilizados por escorrentía superficial hacia estos cuerpos lagunares. Los valores de As también son elevados (731,7 y 1166,7 ug/L) y puede asociarse a la meteorización de los materiales eólicos presentes y a la recarga de las lagunas por agua subterránea con alto contenido de este elemento, y posterior concentración de arsénico por procesos de evaporación.

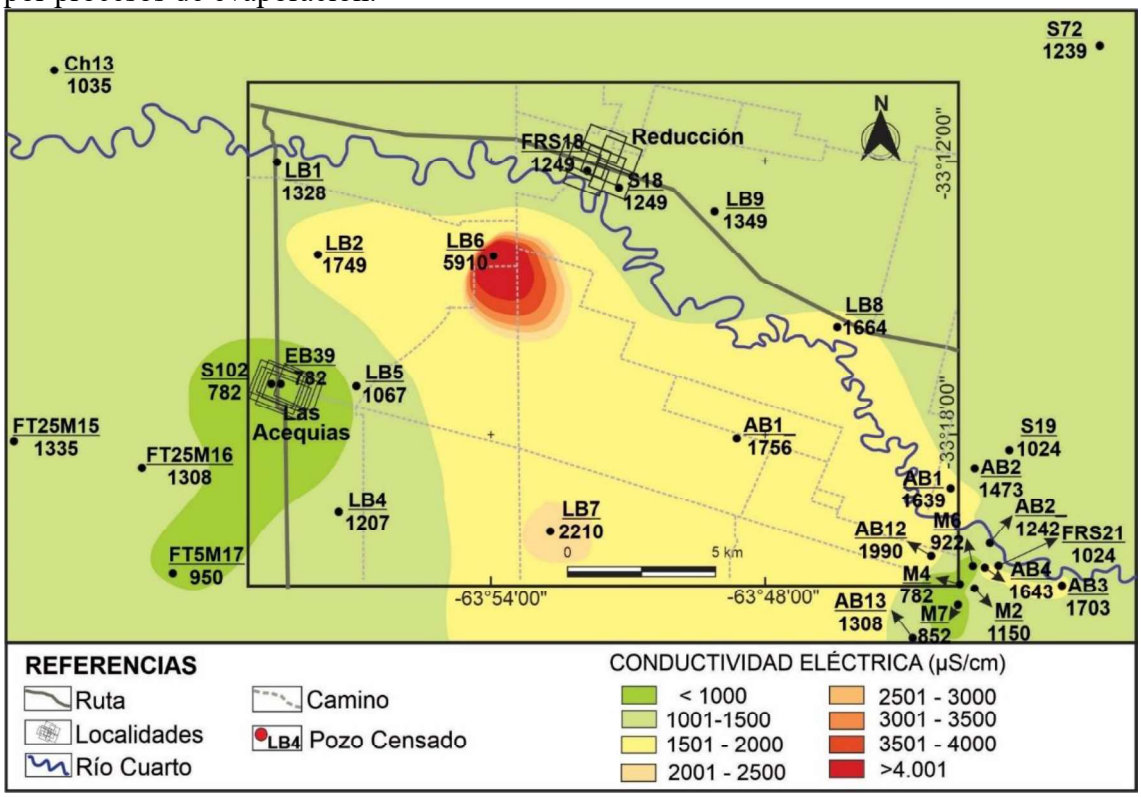


Figura 6. Mapa de Conductividad Eléctrica del acuífero libre.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADO

Para validar el modelo conceptual se realizó el análisis de agrupamiento (cluster), de manera tal que permita establecer cuáles son las asociaciones entre la composición química del agua y las unidades geomorfológicas descriptas (Modo Q).

El análisis en Modo Q, es decir entre observaciones, permitió generar el dendrograma (ver Fig. 7) donde se observan dos grandes grupos y 1 muestra aislada (LB6), por presentar elevados contenidos de NO_3^- (850 mg/L). Los dos grandes grupos, se diferencian esencialmente por la concentración de sales, el contenido de Arsénico y Flúor. El grupo **G1**, queda conformado por 8 muestras, mientras que **G2** por 22 muestras. Se caracteriza por presentar aguas dulces, del tipo geoquímico bicarbonatadas sódicas, con valores de CE localizados entre 1000 – 1500 µS/cm. Se localizan específicamente en la unidad II.- Llanura fluvio - eólica imperfectamente drenada y dentro de esta en la subunidad II.1- Planicie medanosa con paleocauces cubiertos. Las concentraciones de Arsénico se localizan por encima de los 150 µg/L. A su vez este grupo se subdivide en función de las concentraciones de Flúor, quedando el grupo G1a conformado por muestras con concentraciones superiores a 2 mg/L y el grupo G1b con concentraciones inferiores a 2 mg/L.
El grupo **G2**, presenta aguas dulces y el primer corte permite definir un subgrupo **G2a** conformado por 2 muestras de carácter bicarbonatadas sódicas, ubicadas en la unidad III Llanura fluvial del río Cuarto, con valores de CE en el orden de 1250 µS/cm y **G2b** conformado por 19 muestras, también de carácter bicarbonatada sódica (**G2b1**) y 1 muestra aislada de carácter sulfatada sódica (Ch13). En el subgrupo **G2b1**, se identifican dos subgrupos (**G2b1a** y **G2b1b**), Figura 11.2.6.2. El subgrupo **G2b1a**, está constituido por 8 muestras localizadas en la unidad II-Llanura fluvio eólica imperfectamente drenada, cuyos valores de CE son inferiores a 1000 µS/cm en 7 de las muestras, las que se localizan a su vez dentro de la subunidad II.1- Planicie medanosa con paleocauces cubiertos y una de ellas con menor grado de asociación (Figura 11.2.6.2.), ubicada en la subunidad II.2- Sistema lagunar La Felipa (S72), con una CE en el orden de 1239 µS/cm. Las concentraciones de Arsénico para este subgrupo se encuentran por debajo de los 120 µg/L y de Flúor por debajo de 2,3 mg/L.
El subgrupo **G2b1b** (11 muestras), se caracteriza por presentar aguas dulces, con valores de CE ubicados entre los 1200 y 2250 µS/cm, con concentraciones elevadas de Arsénico (> 90 µg/L), moderada a alta concentración de Flúor (0,7 – 2,4 mg/L) y moderada a alta concentración de Nitratos (3 – 230 mg/L). A su vez se puede reconocer dentro de este subgrupo una fuerte asociación entre cuatro muestras, las cuales se localizan en el ámbito de la unidad III- Llanura fluvial del río Cuarto y las restantes en el ámbito de la unidad II- Llanura fluvio - eólica imperfectamente drenada. Del análisis anterior se logra corroborar la fuerte influencia que las unidades geomorfológicas y la litología presentan sobre la calidad físico – química del agua subterránea del acuífero libre en el sector bajo estudio.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

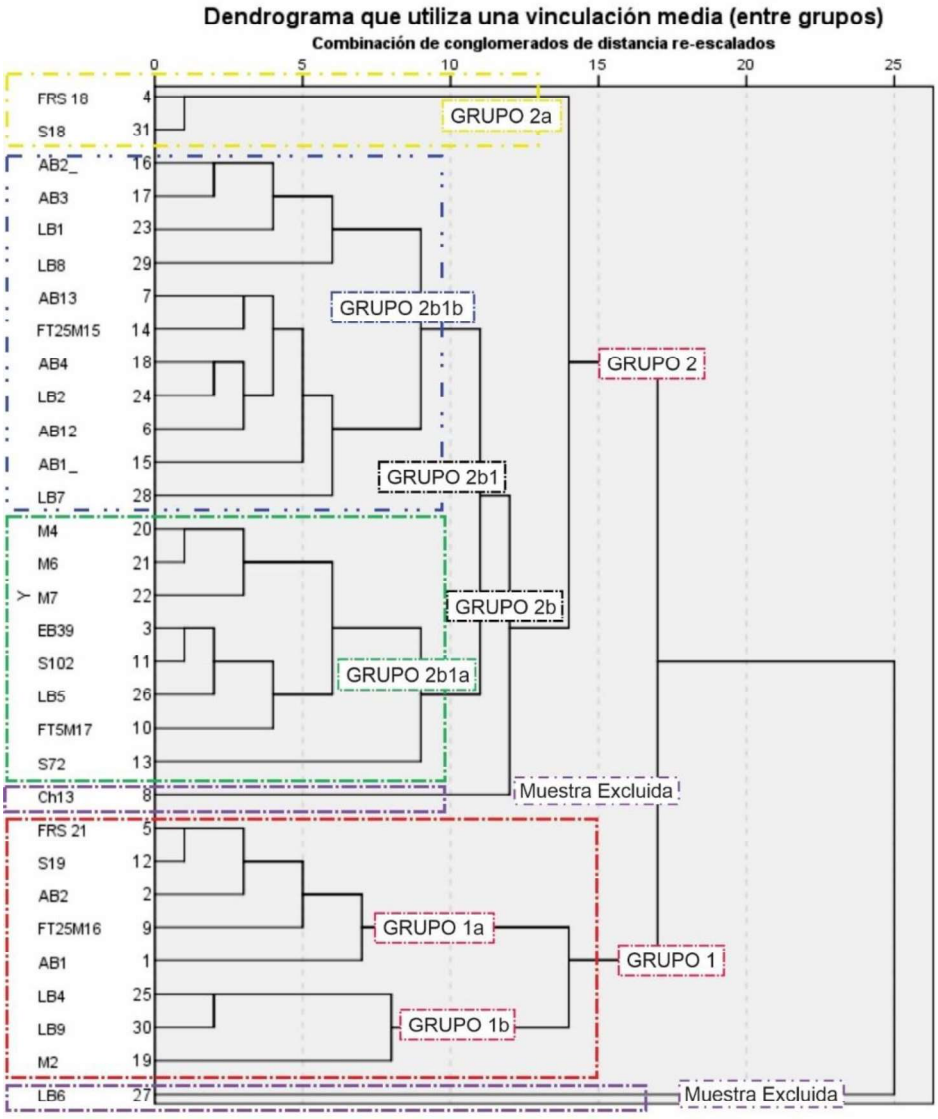


Figura 7. Diagrama Cluster entre observaciones (Modo Q

CONCLUSIONES

Del análisis anterior se logra corroborar la fuerte influencia que las unidades geomorfológicas y la litología presentan sobre la calidad físico – química del agua subterránea del acuífero libre en el sector bajo estudio. La litología se caracteriza por estar compuesta principalmente por materiales finos, eólicos, que le aportan al agua iones, que modifican su composición química y a la vez, disminuyen la velocidad de flujo, permitiendo que esta permanezca mayor tiempo en contacto con los materiales del subsuelo. Por esto, las mayores salinidades se relacionan con sectores de planicie con rasgos eólicos y con predominancia de materiales finos, mientras que, las salinidades mas bajas se relacionan con áreas de paleofajas y paleoderrames con granulometrías mas gruesas. A su vez, los materiales eólicos, como lo es el característico loess pampeano, son la principal fuente de As y Flúor en el agua subterránea, por tal motivo, los valores mas altos de estos iones se observan en los ambientes fuvioeólico y eólico, y los menores en el ambiente fluvial.

REFERENCIAS

Degiovanni, S., Villegas, M. B., Blarasín, M., Sagripanti, G., Coniglio, J., Cabrera, A., ... & Sapp, M. *Hoja Geológica 3363-III Río Cuarto.* (2005).

Blarasin, M., Cabrera, A. y Matteoda, E. Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. *UniRío. Universidad Nacional de Río Cuarto*. Argentina. (2014).

Blarasin, M., Cabrera, A., Quinodóz, F. B., Felizzia, J., & Giuliano Albo, J. (2013). El relieve y su incidencia en el hallazgo de agua para abastecimiento humano en la planicie medanosa sudoriental cordobesa. *In VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamricano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea* (La Plata, 17 al 20 de septiembre de 2013). (2013).

Quinodóz, FB y Blarasin, M. Arsénico y flúor en aguas subterráneas en la planicie sudoccidental de Córdoba. Un problema ambiental analizado desde la perspectiva hidrogeológica. *Revista Estudios Ambientales-Revista de Estudios Ambientales*, 2 (1), 4-23. (2014).

Bécher Quinodóz, F. N., Blarasin, M., & Panarello, H. O. Modelado geoquímico e isotópico de las relaciones agua superficial-subterránea en la planicie arenosa del Sur de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 72(4), 506-518. (2015).

Seager, R., Ting, M., Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., ... y Naik, N. Proyecciones modelo de una transición inminente a un clima más árido en el suroeste de América del Norte. *Ciencia*, 316 (5828), 1181-1184. (2007).

Edmunds, W. M., & Smedley, P. L. Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer. Applied Geochemistry, 15(6), 737-752. (2000).

Giuliano Albo, MJ y Blarasin, MT Hidrogeoquímica y estimación del fondo natural de nitratos del agua subterránea en un agroecosistema del pedemonte de la sierra de Comechingones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71 (3), 378-392. (2014).

Nicolli, H. B., Smedley, P. L., & Tullio, J. O. Aguas subterráneas con altos contenidos de flúor, arsénico y otros oligoelementos en el norte de la provincia de La Pampa: estudio preliminar. *In Congreso Internacional sobre Aguas y Workshop sobre Química Ambiental y Salud, Abstracts*, III-40, Buenos Aires, Argentina. (1997).

CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE NUTRIENTES EN HUMEDALES DE LA PLANICIE COSTERA DE AJÓ

María P. Pasquale Pérez[a], Eleonora Carol[a,b] y Lucía Santucci[a,b]

[a]*Centro de Investigaciones Geológicas, CIG, CONICET-UNLP, ARGENTINA*
[b]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*

e-mail: mppasqualep@cig.museo.unlp.edu.ar

RESUMEN

Los humedales costeros son ambientes que brindan numerosos servicios ecosistémicos como la depuración de aguas y eliminación de nutrientes. La planicie costera de Ajó (Buenos Aires) comprende una zona de marismas actuales y antiguas donde se desarrollan extensas áreas de humedales que actualmente pueden encontrarse afectados por actividad antrópica. El objetivo de este trabajo es evaluar la distribución y concentración de fosfato, nitrato y sílice reactiva soluble en aguas superficiales y subterráneas junto con fósforo biodisponible en sedimentos superficiales de humedales de la planicie costera de Ajó. Se efectuaron estudios en ambientes naturales y ambientes que reciben aportes de una planta de tratamiento de efluentes cloacales. Para ello se generó una red de monitoreo con puntos de muestro de agua superficial y subterránea (freatímetros someros y molinos), y de sedimentos superficiales de los humedales. La zona fue relevada en Noviembre de 2021 y Marzo de 2022, en esta última fecha con menor cantidad de muestras de agua dado que varios sectores no tenían agua en superficie o los pozos más someros estaban secos. La planta de tratamiento de efluentes cloacales constituye una fuente de fósforo al ambiente, por lo que se observan las mayores concentraciones de fosfato en agua y fósforo biodisponible en sedimentos de los sectores próximos al área de vertido de efluentes, disminuyendo posteriormente aguas abajo hacia el sector de la desembocadura. Si bien hay aporte de nitratos provenientes de la planta, su concentración es mayor en el agua subterránea de molinos que en zonas de humedales que reciben efluentes. La sílice reactiva soluble no tiene una procedencia antrópica, registrándose las mayores concentraciones en el agua subterránea, probablemente por la disolución de minerales silicatados presentes en la matriz del sustrato. Finalmente, no se observan variaciones significativas entre muestreos respecto a la concentración y distribución de los nutrientes.

Palabras Clave: Humedales costeros, Efluente cloacal, Nitrato, Fósforo, Sílice reactiva soluble

INTRODUCCIÓN

Los humedales costeros son ambientes altamente productivos que brindan numerosos servicios ecosistémicos como la depuración de aguas y eliminación de nutrientes. Sin embargo, el aporte de nutrientes por actividad antrópica puede superar la capacidad depuradora de estos ecosistemas, llevando a procesos de eutrofización y disminuyendo la calidad del agua de los mismos (Barbier, 2019).

En la planicie costera de Ajó, localizada en la provincia de Buenos Aires, se desarrollan humedales asociados a marismas actuales y antiguas (San Martín, 2020). Las marismas actuales se localizan en los sectores más costeros relacionadas a canales de marea activos, mientras que las marismas antiguas se encuentran en sectores más continentales desconectados del ciclo mareal y actualmente dependen del balance hídrico local para su funcionamiento hidrológico (Carol et al., 2015). Particularmente uno de estos humedales recibe aportes de agua procedentes de una planta depuradora de efluentes cloacales de la localidad de Santa Teresita, Partido de la Costa (ver Fig. 1). El objetivo del trabajo es

evaluar la concentración y distribución de fosfato, nitrato y sílice reactiva soluble en aguas superficiales y subterráneas, junto con fósforo biodisponible en sedimentos, comparando sectores del humedal con y sin influencia de vertidos desde la planta de tratamientos de efluentes cloacales.

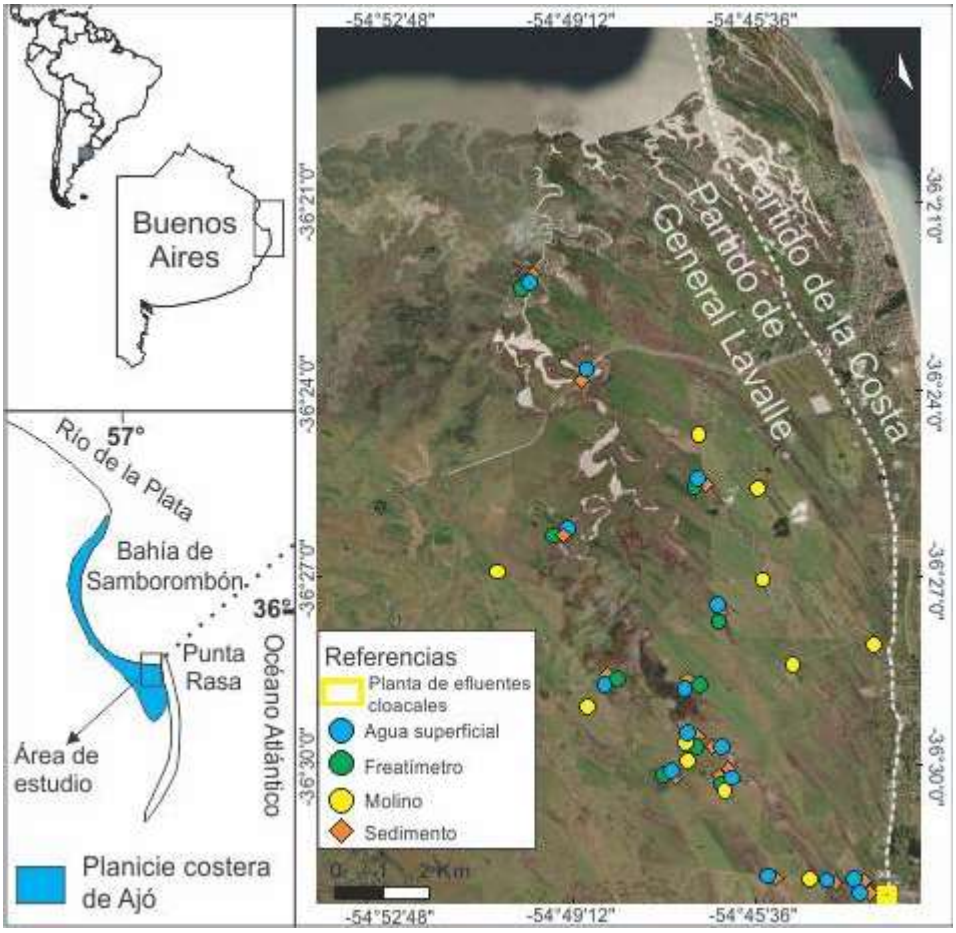


Figura 1: Ubicación del área de estudio y puntos de muestreo.

METODOLOGÍA

Se generó una red de monitoreo con puntos de muestreo de agua superficial (n=15) y agua subterránea que comprende freatímetros someros a menos de 2 m de profundidad (n=9) y molinos que extraen agua hasta 15 m de profundidad (n=11). Dentro de los humedales se tomaron muestras de sedimentos superficiales, recolectando un total de 16 muestras.

La zona fue relevada en Noviembre de 2021 y Marzo de 2022, tomándose menor cantidad de muestras en el segundo muestreo debido a que en diversos puntos no pudieron extraerse muestras de agua ya que varios sectores no tenían agua en superficie o los pozos más someros se encontraban secos. Las determinaciones químicas de fósforo soluble o fosfato (PO_4^{-3}), nitrato (NO_3^-) y sílice reactiva soluble (SRS) se efectuaron en laboratorio mediante espectrofotometría UV-Visible según métodos estandarizados APHA (1998), y el fósforo biodisponible en sedimentos mediante el método de Olsen et al. (1954). Los datos obtenidos se volcaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el fin de observar y estudiar espacialmente la variación de las concentraciones de los distintos compuestos.

RESULTADOS

El contenido de fósforo soluble en el agua superficial varía entre 0,16 a 3,11 ppm en el muestreo correspondiente al mes de Noviembre de 2021, donde las concentraciones más altas se encuentran en el canal de vuelco de la planta de tratamiento de efluentes cloacales al sur del área de estudio, disminuyendo hacia el norte a medida que se aleja del sitio de descarga de los efluentes (ver Fig. 2a). Respecto al agua subterránea, para el mismo periodo de muestreo (ver Fig. 2a), se obtuvieron valores entre 0,03 a 1,56 ppm en las muestras de los freatímetros y entre 0,07 a 2,05 ppm desde los molinos.

En el muestreo correspondiente al mes de Marzo de 2022 las concentraciones de fósforo soluble varían entre 0,05 y 3,46 ppm para el agua superficial y, al igual que la campaña anterior, las valores más altos se encuentran en el sur de la zona de estudio, disminuyendo hacia el norte (ver Fig. 2b). El agua subterránea presenta valores de fósforo soluble que varían entre 0,02 y 1,77 ppm para las muestras más someras obtenidas de los freatímetros y entre 0,05 y 2,04 ppm para las más profundas obtenidas de los molinos (ver Fig. 2b). A diferencia del muestreo anterior realizado en Noviembre de 2021, los valores de fósforo soluble son más elevados en el centro-este del área de estudio para el caso de las muestras de agua de los molinos.

El fósforo biodisponible analizado en los sedimentos del muestreo realizado en Noviembre de 2021 presenta concentraciones entre 1,7 a 21,82 ppm, observándose mayores concentraciones en el sector sur del área, y disminuyendo hacia el norte (ver Fig. 2a). Lo mismo ocurre en el muestreo realizado en Marzo 2022, en el cual los sedimentos presentan concentraciones entre 4,75 a 20,41 ppm, siendo los valores más altos aquellos obtenidos en las muestras del canal afectado por la descarga de los efluentes cloacales (ver Fig. 2b).

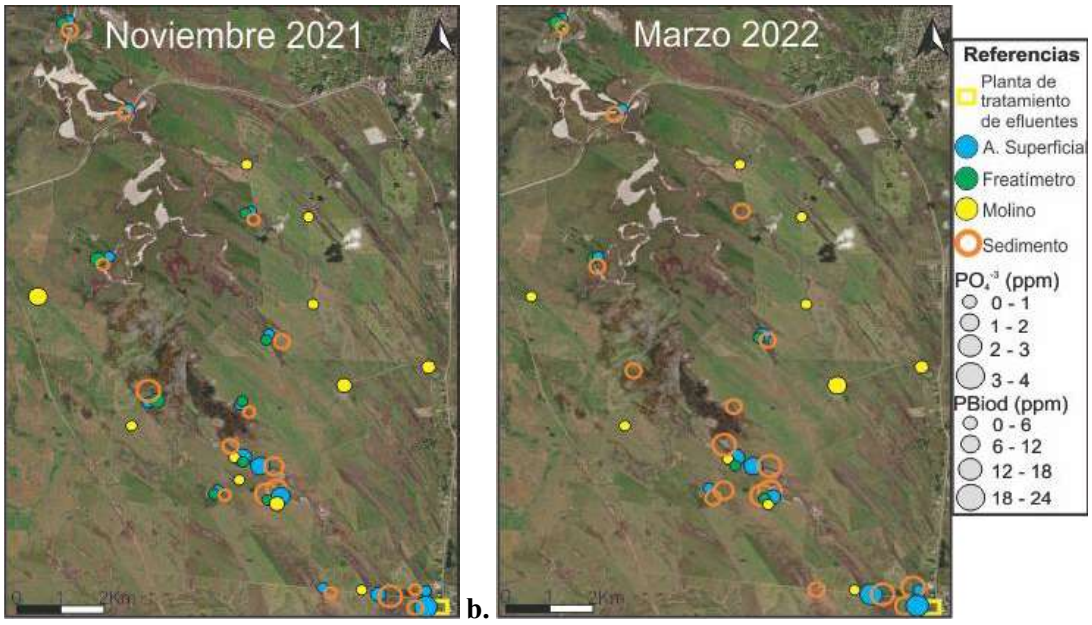


Figura 2. a. Concentración y distribución de fósforo soluble en agua y fósforo biodisponible en sedimentos en Noviembre 2021. **b.** Concentración y distribución de fósforo soluble en agua y fósforo biodisponible en sedimentos en Marzo 2022.

Respecto al ión nitrato, las concentraciones obtenidas en el agua superficial para el muestreo realizado en el mes de Noviembre 2021 fueron entre 3,58 y 49,97 ppm, presentándose los valores más elevados en el sector cercano a la descarga de la planta de

efluentes, concentraciones que disminuyen luego hacia el norte del área de estudio (ver Fig. 3a). Para el mismo periodo de muestreo en el agua subterránea, los valores obtenidos se encuentran entre 5,38 y 27,58 ppm en las muestras de agua proveniente de los freatímetros y entre 5,74 y 144,38 ppm en las muestras obtenidas de los molinos (ver Fig. 3a). El agua subterránea profunda con mayor contenido de nitratos se presenta en dos puntos al este de la zona, pero que no tendrían relación entre sí.

Respecto al muestreo realizado en Marzo 2022 la concentración de nitratos en el agua superficial comprende valores entre 4,53 y 70,55 ppm, de los cuales los valores más elevados se encuentran hacia el sur del área de estudio, en el canal de descarga de los efluentes tratados (ver Fig. 3b), al igual que en la campaña anterior de Noviembre de 2021. El agua subterránea para el mismo periodo de muestreo presenta valores de nitrato de entre 5,69 a 19,69 ppm en el agua procedente de los freatímetros y entre 2,39 y 93,2 ppm en el agua obtenida de los molinos (ver Fig. 3b). En ambos casos la distribución de los valores más altos no difiere de los observados en Noviembre (ver Fig. 3).

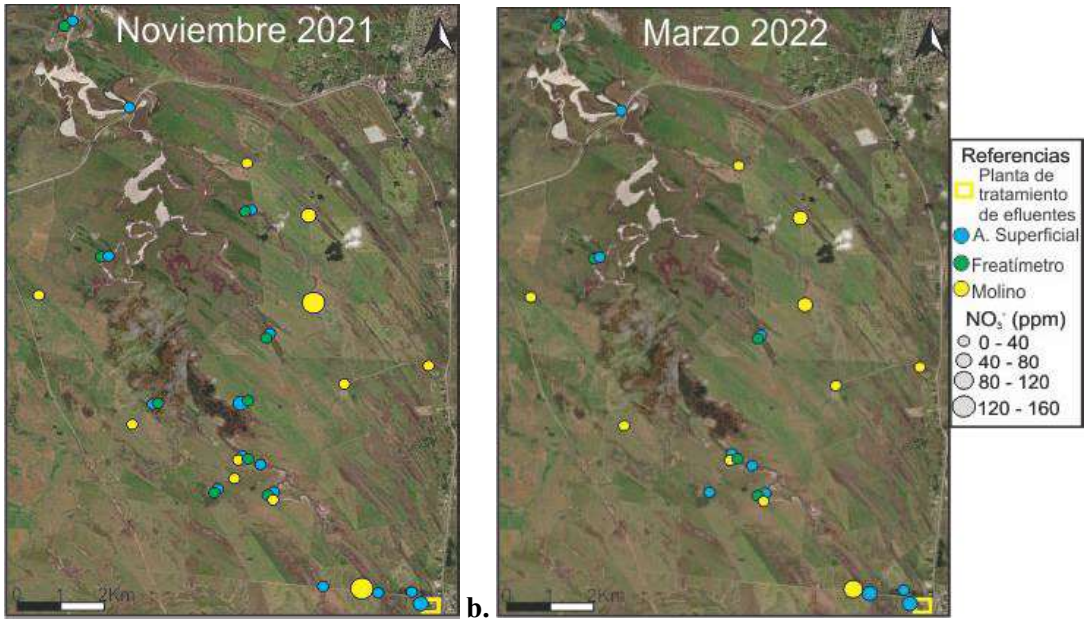


Figura 3. a. Concentración y distribución de nitratos en agua en Noviembre 2021. **b.** Concentración y distribución de nitratos en agua en Marzo 2022.

Respecto a las concentraciones de sílice reactiva soluble (SRS) en el muestreo realizado en el mes de Noviembre 2021 las muestras de agua superficial presentaron concentraciones entre 1,38 y 34,13 ppm, siendo los valores más altos aquellos obtenidos principalmente al oeste de la zona de estudio (ver Fig. 4a). Respecto al agua subterránea, las muestras de agua provenientes de los freatímetros son las que presentan los valores máximos más elevados, con concentraciones entre 31,65 y 62,83 ppm, mostrando concentraciones elevadas en el centro del área. Los datos de SRS obtenidos en las muestras de agua subterránea más profundas mostraron valores entre 27,60 y 49,54 ppm, y puede verse que los valores más elevados se encuentran en el sector central y hacia el oeste (ver Fig. 4a).

En el muestreo realizado en el mes de Marzo 2022 los valores de SRS en el agua superficial varía entre 0,36 y 33,81 ppm, con los valores más altos registrados en el sector sur, en el canal de descarga de las aguas cloacales tratadas (ver Fig. 4b). Este cambio respecto al muestreo anterior podría deberse a que los puntos de muestreo con

 ISBN: 978-987-1323-89-0

concentraciones altas en SRS se encontraban secos en el muestreo realizado en Marzo. Para el mismo periodo de muestreo, la concentración de SRS en el agua subterránea somera correspondiente a los freatímetros varía entre 38,04 y 72,17 ppm, siendo el punto de muestreo con contenido de SRS más elevado aquel ubicado en el centro del sector. Por último, el contenido de SRS obtenido en las muestras de agua obtenidas de los molinos fluctúa de 23,14 a 45,4 ppm, observándose, al igual que el muestreo anterior, las concentraciones más altas en el centro y oeste del área de estudio (ver Fig. 4b).

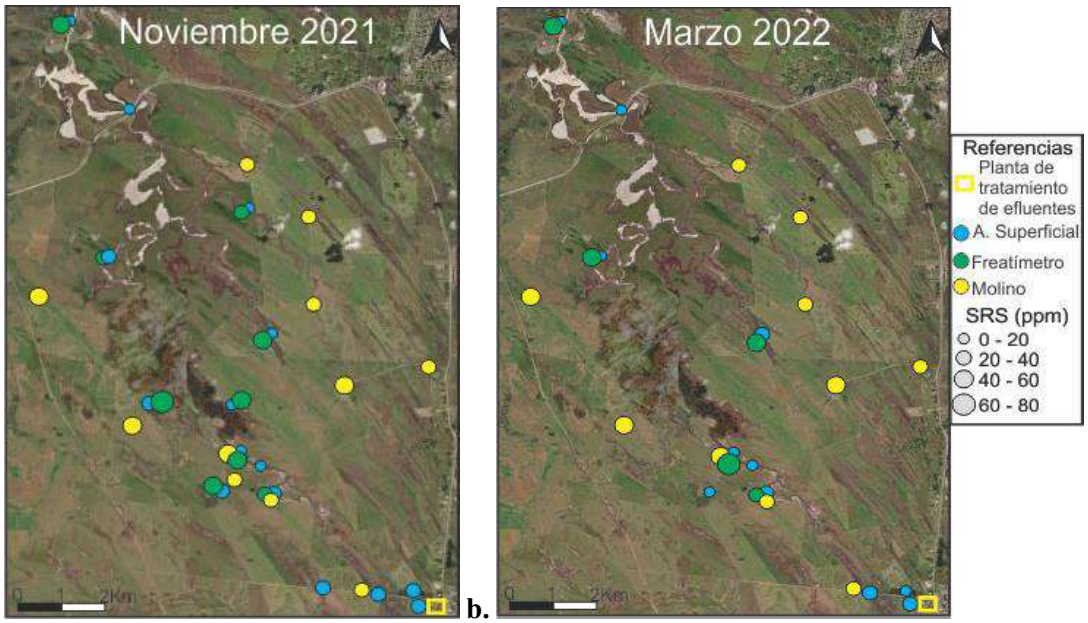


Figura 4. a. Concentración y distribución de sílice reactiva soluble (SRS) en Noviembre de 2021. **b.** Concentración y distribución de sílice reactiva soluble (SRS) en Marzo de 2022

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la planta de tratamiento de efluentes cloacales constituye una fuente principal de aporte de fosfato al agua del sistema de humedales. No obstante, existe una importante retención de fósforo en los sedimentos, demostrando que el humedal actúa como sumidero de nutrientes. De esta manera, el fósforo presenta mayores concentraciones en el agua superficial en el sector sur del humedal próximo al punto de descarga de la planta, registrándose una disminución hacia el norte. Por su parte, si bien el NO_3^- es también un nutriente aportado por los efluentes, éste es un elemento conservativo que registra concentraciones similares al medido en el canal de la planta o incluso mayores al mismo en las muestras de agua subterránea en los humedales que no están conectados al efluente. En estos sectores, las fuentes de este compuesto derivarían de la actividad ganadera que se desarrolla en el área, dado que los puntos de muestreo se encuentran próximos a bebederos o corrales. Por último, la sílice reactiva soluble presenta bajas concentraciones en las aguas tratadas en la planta y en el resto del agua superficial. Las mayores concentraciones se observan en el agua subterránea tanto somera como profunda y su presencia derivaría de la meteorización de minerales silicatados que componen los limos y arenas donde se desarrolla el humedal.

En relación a la variación temporal no se observan cambios significativos de concentración y distribución de nutrientes, no obstante resulta importante continuar con el monitoreo del área en sectores con y sin influencia de la planta de tratamiento de

efluentes cloacales, lo cual permitirá reconocer las modificaciones geoquímicas que esta afectación antrópica introduce al humedal.

REFERENCIAS

APHA (American Public Health Association). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, *20th ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC (*1998).

Barbier, E. B. The value of coastal wetland ecosystem services. *Coastal wetlands, 2nd ed.: 947-964. Elsevier* (2019).

Carol, E., Braga, F., Da Lio, C., Kruse, E. and Tosi, L. Environmental isotopes applied to the evaluation and quantification of evaporation processes in wetlands: a case study in the Ajó Coastal Plain wetland, Argentina. *Environmental Earth Sciences 74:5839 – 5847. DOI: 10.1007/s12665-015-4601-6* (2015).

Olsen, S.R., Cole, C.V, Watanabe, F.S. and Dean, L.A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *US Department of Agriculture. Circular No.* 939 (1954).

San Martin, L. Expresión especial de los humedales en el paisaje de la Llanura Costera de Ajó. Análisis a partir de datos satelitales bajo un enfoque eco-hidrogeomórfico. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Martín (2020).

TIERRA DE HORNOS: CONFIGURACIÓN DE PAISAJES CULTURALES Y CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ARTESANAL DE LADRILLOS EN EL SUR DE MENDOZA, ARGENTINA

Leonardo Salvador Paulides[a], Juan Sebastian Lewin[b] y Tobías Daniel Corvalán[b]

[a] *Cátedra de Arqueología, Profesorado de Historia, Instituto de Educación Superior 9-011 "Del Atuel", San Rafael, ARGENTINA*
[b] *Estudiante, Profesorado de Historia, Instituto de Educación Superior 9-011 "Del Atuel", San Rafael, ARGENTINA*

e-mail: leonardo.paulides@yahoo.com.ar; salva.paulides@gmail.com

RESUMEN

Caracterizamos a los ladrillos cocidos como un producto cerámico y un componente de una tecnología constructiva de larga data con gran distribución temporal y espacial en la arqueología mundial. Entre las ventajas de estos productos se encuentra la relativa facilidad para su producción, la estandarización de formas, su secado, el apilamiento y las posibilidades de combinaciones o trabas entre estos artefactos, lo que mejora la eficiencia en la distribución de cargas como la de compresión. Estas características aumentan sus prestaciones técnicas, la durabilidad y la resistencia frente a factores climáticos. El departamento de San Rafael, Mendoza (Argentina) cuenta con más de 700 hornos de ladrillos artesanales. Desde un punto de vista ambiental, esta producción genera impactos en diferentes escalas según las diferentes etapas en la confección de ladrillos. Esta importante transformación del paisaje manifiesta una sensibilidad arqueológica significativa a partir de la cual nos proponemos caracterizar aspectos relacionados con la variabilidad funcional de estos sitios, la identificación de patrones de segregación o jerarquización del espacio (dentro del área operativa y/o habitacional), la variabilidad de productos cerámicos y la tecnología asociada a estos, y el esbozo de algunas expectativas arqueológicas respecto a los registros de cada uno de las actividades registradas. Por último, consideramos a la tecnología del ladrillo como una serie de estrategias complejas y pautadas que involucran diferentes acciones de aprovisionamiento, elaboración, uso y descarte de materiales. Además, se constituye un espacio ladrillero en el que confluyen aspectos sociales de la fabricación como el género, la jerarquización del espacio y tareas, marcas identitarias, etc.) que permiten reconocer a este espacio como un paisaje cultural único y con dinámicas socio-territoriales con una importante impronta en la identidad cultural local.

Palabras Clave: Hornos ladrilleros, Paisajes Culturales, Arqueología Histórica, Impacto Ambiental, Mendoza.

INTRODUCCIÓN

Los ladrillos cocidos constituyen un producto cerámico que representa un componente de una tecnología constructiva de larga data con gran distribución temporal y espacial en la arqueología mundial (Watt, 1990). Entre las ventajas de estos productos, se encuentra la relativa facilidad para su producción, la estandarización de formas, su secado, el apilamiento y las posibilidades de combinaciones o trabas entre estos artefactos, lo que mejora la eficiencia en la distribución de cargas como la de compresión. Estas características aumentan sus prestaciones técnicas, la durabilidad y la resistencia de las edificaciones frente a factores climáticos de diversa naturaleza.

La producción local de ladrillos artesanales del departamento de San Rafael, ubicado en la provincia de Mendoza y centro-oeste de Argentina, tiene una profundidad temporal y una extensión distribucional tal que es un fenómeno cultural de gran impacto ambiental, con un gran potencial para el estudio arqueológico de la cultura material producida. Asimismo, la característica extractiva de esta actividad minera ha impactado no solo en el territorio y el paisaje socialmente construido, sino también en las relaciones sociales de los actores involucrados en forma directa - o no- y las actividades locales relacionadas con otras ramas productivas que se disputan la superficie de este distrito mendocino.

Esta importante transformación del paisaje manifiesta una sensibilidad arqueológica significativa a partir de la cual nos proponemos caracterizar algunos aspectos relacionados con la variabilidad funcional de estos sitios, la identificación de patrones de segregación o jerarquización del espacio (dentro del área operativa y/o habitacional), las etapas en la elaboración de los productos cerámicos y la formulación de algunas observaciones arqueológicas respecto a las características del registro material. En este sentido, seleccionamos un área de estudio para conocer aspectos organizativos de un espacio ladrillero y para contribuir de manera exploratoria a la comprensión de la materialidad relacionada con la producción artesanal de estos bienes desde un enfoque etnoarqueológico.

Por último, consideramos a la tecnología del ladrillo como una serie de estrategias complejas y pautadas que involucran diferentes acciones de aprovisionamiento, elaboración, uso y descarte de materiales (Schiffer 1972). Además, dentro del espacio ladrillero confluyen aspectos sociales como ser el género, la jerarquización del espacio y roles, la asignación de tareas, las marcas identitarias, la transmisión de saberes intergeneracionales, etc. que permiten reconocer a este espacio como un paisaje cultural único y con dinámicas socio-territoriales que hacen a la impronta de la identidad cultural local

PRODUCCIÓN DE LADRILLOS Y ARQUEOLOGÍA

Las tecnologías constructivas basadas en adobes son de larga data y con una importante distribución temporal y espacial en la arqueología mundial (ICRROM, 1983; Watt, 1990). En este sentido, los ladrillos cerámicos cocidos son una tecnología presente en muchos entornos de arqueología de contacto e históricos. Como artefactos cerámicos, se pueden analizar macroscópicamente en función de su peso, forma, la descripción de sus pastas, el uso de diferentes atemperantes, acabados y tratamientos de la superficie y decoración y aspectos relacionados a la cocción y las estructuras de combustión empleadas (Pedrotta and Gonzalez de Bonaveri, 2006; Wachsman *et al.* 2020, entre otros). Asimismo, existen subproductos asociados a su elaboración con un alto grado de especialización como son los artefactos del toolkit personal (*e.g* banco, molde y tablilla, rastrillo, carretilla de banqueteo) y otros elementos inmuebles de gran porte como estructuras (*e.g* rueda dentada en pisaderos, horno, viviendas); y rasgos con modificaciones muy particulares del espacio (*e.g* canteras, pisaderos, canchas de secado, etc.) que dejan gran cantidad de evidencia arqueológica, con diferentes materiales usados en diferentes instancias del proceso tecnológico y una profunda transformación sobre el medio físico en el cual se asienta esta actividad. Esta evidencia aporta datos y elementos importantes para su caracterización tecno-morfológica, la determinación de su procedencia, función y cronología, así como las implicaciones económicas, sociales y simbólicas en contextos arqueológicos que se remontan desde la época colonial al siglo XXI.

La posibilidad de trabajar desde un encuadre tecno-tipológico utilizando caracterizaciones diseñadas para otros contextos arqueológicos y otros procesos

productivos (*e.g* alfarería), permite repensar esta actividad en función de la dinámica de las transformaciones del paisaje, la variabilidad del registro arqueológico observado y las conductas humanas identificables a partir de ciertos patrones generados en el uso del espacio en cada una de las acciones del proceso productivo.

En la provincia de Mendoza, el estudio de los procesos históricos y arqueológicos relacionados con la arqueología minera se centraron en la descripción y el análisis de las características económicas y socio-políticas y en menor detalle en las condiciones ambientales y minerales para la explotación de los recursos concentrados en el noroeste de Mendoza (departamentos de Las Heras y Uspallata) con relación a las ocupaciones y estrategias de explotación minera realizada entre los siglos XVI al XIX (Durán *et al.* 2002, 2003; Cueto, 2003; Sironi, 2018, entre otros). Asimismo, se realizaron estudios arqueológicos que permitieron una caracterización de estas explotaciones de Precordillera de Mendoza en el sitio histórico Los Hornillos y Mina La Atala (Chiavazza 2005; Chiavazza y Prieto Olavarría 2008, Sironi 2018) que permitieron conocer la integración de esta actividad a los procesos históricos a partir del análisis del registro arqueológico (Chiavazza y Prieto Olavarría 2008). Con relación a los estudios sobre ladrillos cocidos en la provincia de Mendoza, los mismos han sido abordados desde diversos enfoques y disciplinas principalmente en el área de El Algarrobal (departamento de Las Heras). Entre las principales problemáticas, se destaca la caracterización de las condiciones laborales y la erradicación del trabajo infantil (ILO, 2012) y el ciclo de vida (Herrera, 2014; Curadelli *et al.,* 2019).

La escasa cantidad de trabajos con una perspectiva arqueológica y regional frente al impacto regional de esta actividad resulta llamativa. Por ello, proponemos una primera aproximación descriptiva relacionada con la caracterización de elementos que permitan dimensionar la señal arqueológica en estos escenarios y con los cuales se puedan individualizar los rasgos del paisaje asociados con el aprovisionamiento, la producción, uso, mantenimiento y descarte presentes en el ciclo de producción (en el sentido clásico de *chaîne opératoire*). Por otro lado, extendemos la mirada más allá de los objetos y la materialidad para comprender la organización de estas tecnologías en función de las relaciones entre las personas, sus actividades y el uso del entorno inmediato aquellos aspectos que están en niveles más allá del campo de las acciones [inmediatamente visibles] del mundo material considerando que todas las tecnologías comparten al menos 5 componentes en común: *materiales, energía, objetos, gestos u operaciones y conocimiento específico/know-how* (Lemonnier, 1992:3.6).

SALTO DE LAS ROSAS: TIERRA DE HORNOS

El departamento de San Rafael, Mendoza (Argentina) cuenta aproximadamente con más de 700 hornos de ladrillos artesanales. Desde un punto de vista ambiental, esta producción genera impactos en diferentes escalas y se disputa el territorio con otras actividades productivas relacionadas con la producción frutihortícola y la vitivinicultura (Curadelli *et al.,* 2019). Respecto a nuestra área de estudio, la producción de ladrillos cocidos artesanales es una actividad profundamente arraigada en la localidad del Salto de las Rosas, situada en el distrito de Cañada Seca en el departamento de San Rafael (ver Fig. 1). La actividad emplea gran cantidad de personas, que en muchos casos provienen de Bolivia, enriqueciendo con saberes técnicos y conocimiento la fabricación artesanal de estos productos

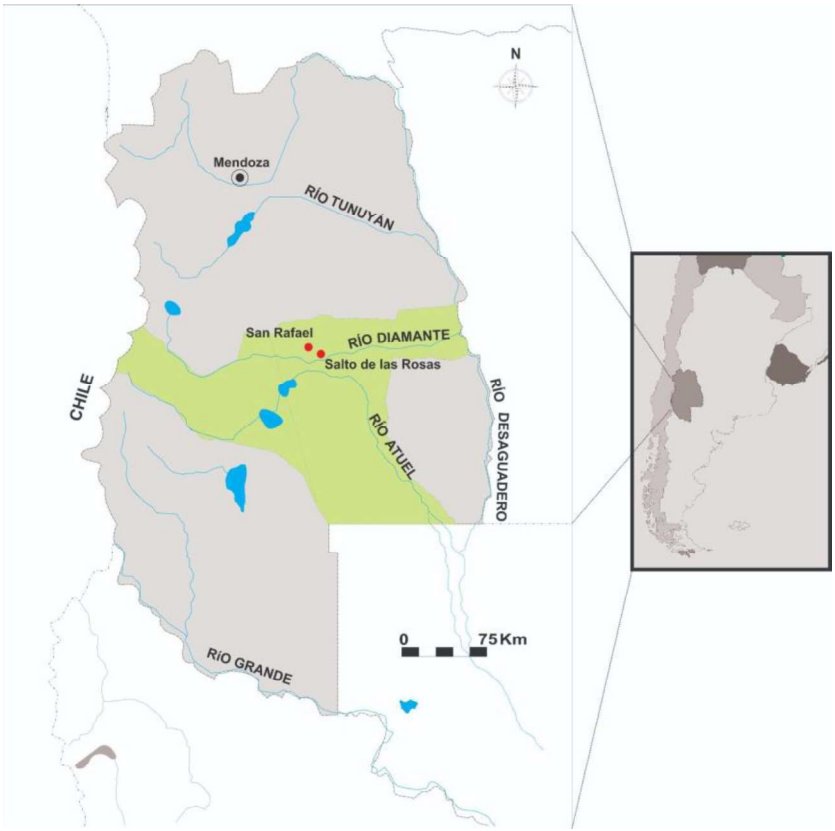


Figura 1. Mapa con localización de la ciudad de San Rafael (Provincia de Mendoza, Argentina).

El conjunto de actividades relacionadas con los hornos ladrilleros puede desarrollarse en ámbito familiar nuclear o extendido o bien la contratación de otras personas sin parentesco. En el trabajo ladrillero intervienen conocimientos que se transmiten en forma intergeneracional y en son muy valorados la rapidez asociada con la práctica y la capacidad de observación y control en el proceso productivo (especialmente durante la preparación del horno y la cocción de los ladrillos).

La perdurabilidad de esta tradición artesanal y la interacción entre la naturaleza y las poblaciones mediadas por prácticas y saberes técnicos, otorgan al paisaje valores y atributos propios que permiten incluir a estos saberes dentro de la categoría de patrimonio **cultural inmaterial.** La Convención para la Salvaguardia del Patrimonio Cultural Inmaterial (UNESCO, 2003). Por lo tanto, podemos afirmar que los valores de integridad y autenticidad de este patrimonio cultural están presentes en la transformación y adecuación del espacio físico, una segregación del espacio según diferentes funcionalidades y las relaciones interpersonales a partir de una actividad comunitaria con sentido identitario cultural y como clase trabajadora. Esta identidad, las prácticas situadas y las transformaciones del espacio nos llevan a pensar la región como un paisaje culturalmente construido con valores naturales y culturales propios desde una vinculación experiencial característica y atributos propios de este territorio (UNESCO, 1972;2003;2005).

RESULTADOS GENERALES: CARACTERIZACIÓN DEL CAMPAMENTO

Se realizaron dos visitas a campo en la localidad del Salto de las Rosas a una propiedad dedicada desde hace casi 50 años a la producción de ladrillos artesanales. La superficie

del predio es de 0,46 km^2 y se encuentra a 50 metros de la ruta nacional Nº 143, con aproximadamente 740 metros en sentido N-S y 715 en sentido E-O, con su extremo sur delimitado por el recorrido de las obras de irrigación de un canal aliviador y a unos 400 metros del cauce del río Atuel.

Si bien el espacio cuenta con un propietario, éste subdivide el área o subarrienda a diferentes *dueños de hornos*, los cuales cuentan con su propia vivienda del núcleo familiar y eventuales parientes. De este modo, cada dueño de horno dispone de un espacio al interior de la finca en el cual desarrolla la producción de ladrillos. La unidad básica para la producción de ladrillos se la conoce como ***campamento*** (ver Fig. 2). Se trata de la unidad más significativa y suele ser un área previamente alisada con mucho esmero. Esta zona de trabajo se subdivide en 3 sectores: *pisadero* (donde se mezcla la arcilla con otros elementos y se hace la pasta), cancha (en donde se cortan los ladrillos, se los banquetea y seca) y el *horno* (en donde se arma la estructura de combustión, se cocina el ladrillo y se lo palletiza para la venta) (UNRN-CFI, 2014; Curadelli *et al.,* 2019).



Figura 2. Detalle de campamento de ladrillos con la distribución espacial de sus rasgos característicos.

La división entre cada campamento suele estar dada por caminos internos irregulares por los cuales se trasladan las familias de las y los trabajadores, los ladrilleros y los camiones que traen leña y otros agregados para la pasta o bien que intervienen en el traslado de ladrillos para su venta.

En el área de estudio se registraron 4 subáreas de campamentos: A1 (0,2 km2, con 12 campamentos con 28 hornos), A2 (0,1 km^2, con 5 campamentos con 7 hornos), A3

(0,015km^2, con 1 campamentos y 2 hornos) y A4 (0,006 km^2, con 1 campamento y 2 hornos). A su vez se detectaron 3 sectores de acopio de limo-arcilla: B1 con 0,006 km^2, B2 con 0,04 km^2 y B3 con 0,007 km^2. Asimismo, existen pequeños parches de reserva natural con vegetación al interior de la propiedad, pero fundamentalmente a lo largo de las obras de irrigación con un radio de 10 metros respecto a estas. Las casas suelen estás ubicadas al sudoeste de la zona de hornos posiblemente fuera del área de influencia directa de gases sulfurosos de la combustión o las mayores concentraciones de material particulado.

Con relación a la cadena operativa y las etapas registradas, existen diferentes momentos y actividades del proceso de elaboración y producción de ladrillos (ver Tabla I y Figura 2). Para cada una de estas fases se pueden distinguir un tipo de toolkit de cada trabajador para la ejecución técnica de cada operación, herramientas compartidas entre conjuntos de trabajadores (*e.g* alisadores, carretillas, etc.). Además, existe una segregación espacial muy sectorizada y un acondicionamiento del terreno para cada una de las tareas, con marcadas señales arqueológicas en forma de rasgos o estructuras (*e.g* pisaderos, concentración de carbonilla, una mayor rubefacción del sedimento y alteraciones térmicas en pisos de estructuras de combustión).

Tabla I. Etapas de la cadena operativa del proceso de elaboración de ladrillos artesanales.

Etapas	Descripción
Aprovisionamiento	Se localizan canteras de arcillas y se ***destapa*** el horizonte orgánico para remover limos y arcillas para acelerar su meteorización. Preparación de mezcla o ***pasta*** con otros materiales: arena, aserrín, orujo de uva, abono o bosta de caballo y cal. Suele estar en áreas próximas a los campamentos.
Llenado de pisadero	Se mezclan arcilla, bosta, cal, arena, aserrín y agua en un círculo con un eje central en donde se monta una rueda metálica traccionada por un tractor/caballo que gira en torno al área llamada pisadero en donde se forma la ***pasta*** del futuro ladrillo. Se complementa el trabajo con el acarreo de materiales en ***carretillas***, su distribución con ***rastrillos y palas*** y la integración de los elementos con la ***rueda dentada*** durante 12 a 16 hs. Se deja reposar la pasta según las condiciones meteorológicas tapada con nylon agrario y cubiertas de vehículos o piedras encima. El pisadero suele tener un diámetro que oscila entre 12 a 13,4 metros.
Corte/Moldeo	Es el ***corte manual*** de los ladrillos crudos utilizando una ***carretilla cargadora de madera o metal, batea o banco de trabajo, molde y tablilla/regla de corte y tacho*** con agua.
Tirado/Secado	Consiste en: 1. ***Tirado o*** *desmolde* y disposición de ladrillos en ***cancha*** *(secado llamado* ***«cruda»****)* (superficie llana de secado en el suelo) y 2. Apilado en ***trabas diagonales*** *o* ***pilas***, o segundo momento de secado para mejor aireación y secado uniforme. Asentadoras

Llenado de horno	Consiste de dos momentos: 1. Se apilan las ***corridas o falsas o trancas*** (hileras de ladrillos) en el horno, 2. El ***banqueteo*** (relleno de horno) y relleno con ***carbonilla de piedra*** entre hileras de ladrillo (carbón vegetal entre hileras internas del horno).
Quema de ladrillo	Se llenan las bocas u hornallas inferiores del horno con leña de caldén durante el armado apilada de ladrillos y en la combustión. Se realiza un sellado con una mezcla de barro fresco con pasto llamada ***rafas*** para impermeabilizar la pared externa y el techo del horno y así evitar la pérdida calórica. Se encienden las hornallas o bocas que son selladas durante una cocción que dura de 70 a 92 hs. produciendo entre 45.000 a 250.000 mil ladrillos por horno.
Palletizado Productos	Se palletizan los hornos y se los carga con clark en camiones o al costado del horno hasta que surja un/a comprador/a. Existen productos de diferentes medidas, calidades, pesos y usos. Primera y segunda calidad, adobón, punta verde, escoriado y tejuelas, entre otros.



Figura 2. Cadena operativa y cultura material del proceso de elaboración de ladrillos artesanales. **a.** Pisadero, **b.** Cancha, **c**. Detalle de corte de ladrillos y batea, **d**. Boca de horno, **e**. Ganchos y atizadores para leña en hornos, **f.** Horno en combustión con detalle de rafas de ladrillos intertrabados y **g.** Ladrillos cocidos aguardando proceso de estiba.

Por último, otro rasgo interesante es la presencia de artefactos ligados a las infancias como juguetes que se encuentran en gran parte de los campamentos y elementos asociados al consumo de la unidad doméstica que están siempre en torno a las viviendas. Las canchas suelen ser espacios que son mantenidos en forma permanente, ya sea nivelando la superficie de secado y banqueteo o bien eliminando piedras y barriendo la zona para no

agregar materiales ajenos al ladrillo que pudieran alterar la calidad de los mismos. Por último, en el trabajo suelen intervenir todos los géneros con igual distribución de tareas, aunque por lo general los ladrilleros más experimentados son quienes controlan el delicado proceso de horneado o cocción final.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue brindar una caracterización de un área de campamentos de hornos de ladrillos para comprender la conformación del paisaje cultural ladrillero y analizar su correspondiente señal arqueológica en el terreno. En función de esta primera aproximación, se pudieron obtener algunas conclusiones preliminares. En este sentido podemos afirmar que los campamentos se caracterizan por:

- Una alta segregación espacial y diferenciación funcional de cada área de actividad;
- La identificación de patrones espaciales respecto a la jerarquización del espacio de trabajo o campamento y otras áreas asociadas menos ordenadas como bancos/fuentes de arcilla
- Una importante variabilidad artefactual presente en toolkits individuales especializados y conservados y compartidos para cada etapa de trabajo.
- Expectativas arqueológicas respecto a los registros de cada uno de los sitios comparados.
- Una obstrusividad y visibilidades variables entre cada una de las actividades y los rasgos observados en el terreno.
- Áreas con mayor dinamismo como las canteras y otras más fijas como los hornos y pisaderos.
- Una actividad con grupos familiares conviviendo en los espacios de trabajo y con todos los géneros involucrados en la producción artesanal.

En función de lo expuesto, consideramos que el análisis y la caracterización arqueológica de estos procesos de producción artesanal enriquecerá el conocimiento sobre la historia local y la instalación del complejo ladrillero en el centro de la provincia de Mendoza desde aproximadamente más de 110 años. Asimismo, y siguiendo a Lemmonier (1992) el estudio de la tecnología nos permite comprender esta producción cerámica desde la interacción entre diferentes componentes materiales, sociales y simbólicos que la atraviesan.

REFERENCIAS

Bousman, C. B. Hunter–gatherer adaptations, economic risk and tool design. *Lithic Technology* 18 (1–2): 59-86. (1993).

Cortegoso, V. Aproximaciones teóricas y metodológicas para el estudio tecnológico: variables sincrónicas y diacrónicas en el análisis lítico, 59-60: 107-148. (2005).

Cueto, A. (comp.) *Minería e impacto en Mendoza*. Editorial de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina. (2003).

Curadelli, S., López, M., Piastrellini, R., Arena, P. and Civit, B. *Estudio Socioambiental de la Producción de Ladrillos Artesanales en Mendoza desde la perspectiva del Análisis de Ciclo de Vida*, UTN. Buenos Aires. EduTecNe (2019).
https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/3719/Estudios%20socio%20ambiental%20ladrilleras%20artesanales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Chiavazza, H. and Prieto Olavarría, C. Arqueología de la minería en el sitio precordillerano Los Hornillos (Reserva Natural Villavicencio –RNV-, Mendoza). *Revista de Arqueología Histórica Latinoamericana y Argentina* 2: 43-76. (2008).

Durán, V., Altamira, M., Vega, B., Zarandón, N., Rey, P. and Ulloa, P. Eran unas minas de plata. Arqueología e Historia de la minería del siglo XIX en la precordillera mendocina. *Actas del Primer Congreso Nacional de Arqueología Histórica Argentina*, pp. 199-216. Corregidor. Buenos Aires. (2002).

Durán, V., Figueroa, P., Gasco, A., Altamira, M., Rey, A., Estrella, D., Vega, B. Zarandón, N. and Pantanetti, M. Análisis arqueológico de la minería industrial de fines del siglo XIX en el Paramillo de Uspallata. En: Cueto, A. (comp.) *Minería e impacto en Mendoza* , pp. 153-203. CEIDER. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. (2003).

García Rosello, J. Cadena operativa, forma, función y materias primas. Un aporte a través de la producción cerámica del centro de Chile. *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología* XXXIV: 123-148. (2009).

Hanela, J. E. ¿Cómo estudiar los ladrillos?: estudios para la caracterización de ladrillos de tierra cocida en el poblado de San José de Flores, *Revista de Arqueología Histórica Argentina y Latinoamericana*, Dossier "Arqueología Histórica Argentina. Situación y perspectivas". Número 12: 996-1009. (2018). https://plarci.org/index.php/RAHAYL/article/view/256/210

Herrera, A. *Estudio ambiental y social del Ciclo de Vida de la producción de ladrillos artesanales, utilizando combustibles tradicionales y alternativos en el Algarrobal, Mendoza. Evaluación de daños en los recursos naturales, en la calidad de los ecosistemas y en la salud humana.* Tesina de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Facultad Ciencias Agrarias-UNCuyo. Mendoza. (2014). https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/6110/herrera-analia-tesinairnr.pdf

ICRROM. *El adobe*. Simposio internacional y curso – Taller sobre conservación del adobe. Informe final y ponencias principales, Lima - Cusco (Perú) (1983). https://www.iccrom.org/sites/default/files/2018-02/1983_mutal_adobe_spa_32420_light.pdf

ILO *Trabajo infantil en hornos de ladrillos, Las Heras, Mendoza.* OTIA-Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social. Buenos Aires, Subsecretaría de Trabajo y Seguridad Social, Mendoza; Oficina de País de la OIT para la Argentina; UNICEF Argentina (2012). https://www.ilo.org/legacy/spanish/buenos-aires/trabajo-infantil/resource/bibliografia/industria/9_hornos_ladrillos_mendoza.pdf

Lemmonier, P. 1992. Elements for an Anthropology of Technology, Anthropological Papers Museum of Anthropology 88. University of Michigan. Ann Arbor, Michigan.

Marrocchino, E., Telloli,C., Cesarano, M. and Montuori, M. Geochemical and Petrographic Characterization of Bricks and Mortars of the Parish Church Santa Maria in Padovetere Comacchio, Ferrara, Italy), *Minerals* 11 (5), 530. (2021). https://doi.org/10.3390/min11050530

Nelson, M. C The Study of Technological Organization. *Advances in Archaeological Method and Theory* 3, 57-100, University of Arizona Press, Tucson. (1991).

Orton, C., Tyers, P. and Vince, C. *La cerámica en arqueología*. Editorial Crítica, Barcelona. (1997).

Pedrotta. V. and González de Bonaveri, M. I. Materiales sintéticos: composición y producción. En: Pérez de Micou, Cecilia (ed.), *El modo de hacer las cosas. Artefactos y ecofactos en Arqueología.,* pp 187-231. Buenos Aires, Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires. (2006).

Romay, C. and Rodríguez, G. Ladrillos y ticholos en el Montevideo del siglo XIX, *3º Congreso Iberoamericano y XI Jornada de Técnicas de Reparación y Conservación del Patrimonio*, Tópico 1, nº17: 1-12 (2013).

Rye, O. *Pottery technology*. Aldine Manuals on Archaeology 4. Taraxacum. (1981)

Schiffer, M. B. 1972. Archaeological Context and Systemic Context, *American Antiquity* 37 (2): 156-165.

Sironi, O.Arqueología industrial en mina “La Atala” (Reserva Natural Divisadero Largo, Mendoza). Revista De Arqueología Histórica Argentina Y Latinoamericana, 12(3), 835–861. (2018). https://www.rdahayl.com/index.php/rdahayl/article/view/161

UNRN-CFI *Evaluación y propuesta de ordenamiento de la actividad ladrillera en la región de Allen, Provincia de Río Negro.* Universidad Nacional de Río Negro. (2014). https://www.investigacionesfopea.com/hornos-ladrilleros/50215.pdf

Wachsman N.J., Callegari, A. B., de Acha, S.E. and Soto, D.M. Está que arde. Hornos de cocción cerámica del sitio La Cuestecilla, La Rioja. Análisis de las tecnologías de Cocción. *Arqueología* 26 (1): 57-85. (2020). http://revistascientificas.filo.uba.ar/index.php/Arqueologia/article/view/5946/7009

Watt, K.A. *Nineteenth Century Brickmaking Innovations in Britain: Building and Technological Change*, A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, The University of York, The Institute of Advanced Architectural Studies, MS (1990). https://etheses.whiterose.ac.uk/4248/1/DX094368.pdf

VELOCIDADES DE ONDAS SCHOLTE EN SEDIMENTOS MARINOS: SENSIBILIDAD A LAS PROPIEDADES GEOACÚSTICAS Y PETROFÍSICAS

Claudia L. Ravazzoli[a,b], María Florencia Varela[a] y E. Diego Mercerat[c]

[a]*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata y*
[b] *CONICET, ARGENTINA*
[c] *CEREMA Mediterraneé, FRANCIA*

e-mail: cravazzoli@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se propone la implementación de un flujo de trabajo basado en modelos de física de rocas para la estimación de las propiedades elásticas de las rocas sedimentarias poco consolidadas de la corteza oceánica, el ajuste de velocidades sónicas compresionales, la predicción de las velocidades de corte y el cálculo y análisis de las curvas de dispersión de velocidades de ondas Scholte V_{SH} asociadas (para el modo fundamental y el primer modo superior). Para ilustrar el procedimiento se utilizaron datos de dominio público correspondientes a dos pozos del programa IODP en el Golfo de Bengala (océano Índico). Para la calibración del modelo se utilizan las mediciones de velocidad sónica compresional, densidad, porosidad, fracciones mineralógicas y espesores de la secuencia sedimentaria, además de las propiedades físicas del basamento basáltico, del agua de mar y su profundidad. A partir del modelo calibrado realizamos diversos análisis de sensibilidad de las velocidades de ondas Scholte y sus curvas de dispersión, en un rango de frecuencias que abarca las ondas sismológicas, el ruido sísmico y la sísmica de exploración, variando las propiedades geoacústicas y petrofísicas de las diferentes capas. La sensibilidad de V_{SH} ante cambios en la velocidad de onda S, como se espera, es mucho más marcada en comparación a la de onda P, teniendo correlación directa con ambas para el rango de frecuencias analizado. Con respecto a la porosidad, observamos alta sensibilidad de V_{SH} para ambos modos, exhibiendo correlación inversa entre ambas magnitudes. Del presente análisis se establece la factibilidad de invertir a partir de velocidades de ondas Scholte no sólo velocidades de corte y espesores (aplicaciones ya conocidas), sino también información petrofísica de interés para la caracterización del fondo marino.

Palabras Clave: Sedimentos Marinos, Física de Rocas, Ondas Scholte, Velocidades Sónicas

INTRODUCCIÓN

Estudios recientes han demostrado que el análisis y procesamiento de las señales correspondientes a ondas superficiales o de interfaz son herramientas eficaces para la inversión de parámetros geoacústicos del fondo oceánico. Los mismos se basan en el carácter dispersivo de las ondas de superficie de banda ancha, que se propagan a lo largo de la interfaz entre el agua de mar y el fondo marino (Dong et al. 2021, Wu et al. 2018). En tal sentido, es importante comprender cuales son los parámetros críticos en las propiedades elásticas y velocidades de propagación de ondas sísmicas y acústicas en sedimentos del fondo marino, lo que es de interés en diversas áreas. En particular, las ondas de corte y las ondas de interfase tales como las Rayleigh (que se propagan y producen deformaciones en la proximidad de una superficie libre) y las *ondas Scholte* (en interfases fluido-sólido, también llamadas *ondas Rayleigh generalizadas)*, son de gran interés en estudios sismológicos, en ingeniería y en acústica oceánica (Ballard y Lee, 2017, Kugler et al. 2007). En ciertos casos, el interés se centra en las ondas de gran

amplitud y de baja frecuencia (menores a 10 Hz) generadas por terremotos y explosiones nucleares. En otros, las ondas de corte y de interfase de alta frecuencia (mayores a 10 Hz) se utilizan para sondeo del fondo marino y caracterización de sus sedimentos, lo que es de suma importancia para estudios geotécnicos relacionados con la estabilidad de depósitos de plataforma y prospección geofísica off-shore. El estudio de las propiedades de la capa de sedimentos del fondo marino también es necesario para el diseño y la ubicación de estructuras de ingeniería civil en el fondo marino (Hovem, 1991) y para evaluar la estabilidad y riesgo de deslizamiento de grandes masas de sedimentos submarinos (Madrussani et al. 2018).

Las distintas ondas superficiales tienen varias características comunes y sus velocidades de fase están fuertemente relacionadas con la velocidad de la onda de corte. Son evanescentes, es decir, presentan un decaimiento exponencial con la distancia desde la interfaz donde se producen, y si el medio no es homogéneo y también son dispersivas. En particular, las ondas Scholte (Scholte,1947), se propagan a lo largo de la interfaz entre fluidos y sólidos, por ejemplo, en el entorno del contacto entre agua y sedimentos. La mayor parte de su energía se propaga en una región poco profunda, aproximadamente igual a una longitud de onda. Por ende, su propagación estará fuertemente influenciada por las propiedades elásticas de dicha zona del subsuelo. Dichas ondas además presentan un modo fundamental y modos superiores, viajando estos últimos más rápido que el primero.

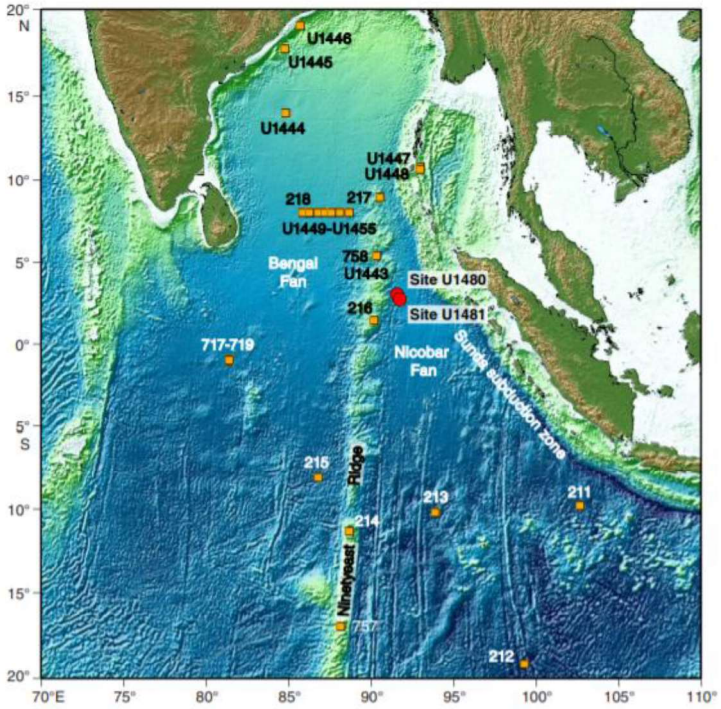


Figura 1. Ubicación de los pozos utilizados de la Expedición 362 en el Océano Índico.

La conocida y fuerte correlación existente entre la rigidez o módulo de corte de un medio elástico y las velocidades de las ondas de corte S, Scholte y Rayleigh hacen que las mismas sean de interés para la caracterización mecánica de los sedimentos puesto que, a diferencia de las ondas de compresión P, son mucho más sensibles a las variaciones litológicas que al contenido de fluido. Sin embargo, a nuestro entender, no se han hecho hasta el momento análisis paramétricos teniendo en cuenta la influencia de las propiedades petrofísicas y geoacústicas de los sedimentos y su estratificación, observándose que los trabajos existentes se han centrado principalmente en el modelado y predicción de las velocidades de las ondas corpóreas. Con estas motivaciones, en el presente trabajo se describe la implementación de un flujo de trabajo basado en modelos de física de rocas para el cálculo de las propiedades elásticas de las rocas sedimentarias poco consolidadas del fondo oceánico y la predicción y ajuste de las velocidades de propagación de ondas P y S en dichos ambientes. A partir del modelo calibrado analizamos la sensibilidad de las velocidades de ondas Scholte y sus curvas de dispersión, en un rango de frecuencias entre

0 y 100 Hz, variando las propiedades geoacústicas de las diferentes capas que forman el espesor sedimentario. Como se espera, la sensibilidad de la velocidad de onda Scholte ante cambios en la velocidad de onda S, es mucho más pronunciada en comparación a la de onda P, mostrando correlación directa con ambas en todo el rango de frecuencias estudiado. Con respecto a la porosidad, observamos alta sensibilidad de la velocidad de onda Scholte para ambos modos, exhibiendo una marcada correlación inversa entre ambas magnitudes. Del presente análisis se concluye que las curvas de dispersión de onda Scholte para ciertas frecuencias permitirían invertir no sólo velocidades de corte y espesores, como es sabido, sino también información petrofísica relevante en escalas de observación adecuadas para la caracterización mecánica del fondo oceánico con fines aplicados. Cabe destacar que los resultados de este trabajo se basan en el trabajo de Varela (2021) y que un análisis preliminar fue presentado por Varela et al. (2021).

ZONA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS

La calibración de los modelos a analizar se realiza utilizando un conjunto de datos de dominio público, adquiridos durante octubre de 2016 en el marco de la campaña 362 realizada en el Océano Índico por el *International Ocean Drilling Program (IODP)*. En dicha campaña se perforaron dos pozos en los sitios denominados U1480 y U1481. El sitio U1480 está ubicado a 3°2.04'N, 91°36.35'E, la profundidad del agua en este punto es de 4148 m y se alcanzó una profundidad de perforación de 2510.2 mbsf (*meters below sea floor*). Las coordenadas del pozo U1481 son 2°45.26'N, 91°45.58'E, la columna de agua es de 4178 m y se perforó un espesor sedimentario total de aproximadamente 1500 mbsf. Para mayores detalles sobre estas campañas véase: https://brg.ldeo.columbia.edu/logdb/ y http://publications.iodp.org/proceedings/362/362title.html. Se extrajeron coronas, se registraron perfiles sónicos compresionales, de porosidad neutrónica y de densidad volumétrica. Además se realizaron estudios de difractometría de RX en laboratorio sobre testigos corona para determinar el contenido mineralógico de los sedimentos. La sucesión sedimentaria oceánica en esta región, de 60–70 Ma, comprende una capa pelágica basal cubierta por sedimentos del abanico submarino de Nicobar. Durante la campaña de perforación se tomaron también muestras del basamento oceánico en el Sitio U1480 con sedimentos suprayacentes que confirman una edad del Cretácico Tardío. La velocidad de onda P promedio del basamento basáltico es de aproximadamente 5500 m/s y las mediciones de su densidad en muestras arrojan una densidad de 2.75 g/cm^3. Dado que no se dispone de determinación de la velocidad de onda S en el basamento, recurrimos a una correlación empírica dada por Brocher (2005), obteniendo una velocidad de corte aproximada de 3301.5 m/s. Consideramos que dicha estimación es consistente con los valores medios del modelo CRUST 2 para corteza oceánica, por lo que será utilizada para los análisis siguientes. Dentro del espesor sedimentario las principales litologías encontradas en ambos sitios son lodo con nanofósiles, lodo siliciclástico y arena siliciclástica. Las litologías dominantes son arcillas, arcilla limosa y arena de grano fino bien clasificada, mientras que las menos abundantes son mezclas de arcilla, limo y arena, incluyendo minerales como cuarzo, plagioclasa y calcita. El espesor comprende 8 sub-unidades litológicas definidas por MacNeil y Dugan (2016).

MODELADO DE PROPIEDADES ELÁSTICAS Y VELOCIDADES P Y S DE LOS SEDIMENTOS

El flujo de trabajo a presentar se basa en la aplicación del modelo de Dvorkin et al. (1999), ampliamente aceptado en estudios geofísicos. Este modelo se basa en una modificación de las cotas clásicas de Hashin-Shtrikman (1963) para los módulos de la matriz seca en

sedimentos marinos poco consolidados, el que posteriormente es combinado con el módulo de Gassmann (1951).

En primer lugar, utilizando las fracciones mineralógicas medidas en laboratorio, se calculan las propiedades elásticas efectivas de los granos multiminerálicos: incompresibilidad, rigidez y coeficiente de Poisson, que denotaremos K, G, ν mediante el promedio de Hill, partiendo de los valores de la Tabla I.

Tabla I. Modulos elásticos y densidad de los minerales principales.

	Arcilla	Cuarzo	Plagioclasa	Calcita
Módulo de volumen (GPa)	21	36.6	76	62
Módulo de corte (GPa)	7	45	26	32
Densidad (g/cm^3)	2.77	2.65	2.5	2.71

El paso siguiente consiste en estimar las propiedades elásticas de la matriz de roca sedimentaria K_{dry}, G_{dry}. Como es sabido la porosidad es uno de los parámetros petrofísicos que rigen el comportamiento mecánico de las rocas. A medida que ésta aumenta, los granos van perdiendo contacto entre ellos y la roca disminuye su rigidez, generando una disminución en los módulos elásticos y en las velocidades. Para estudiar este efecto Nur et al. (1998) introducen el concepto de *porosidad crítica* ϕ_c, definiéndola como la máxima porosidad que puede tener una roca consolidada. Una vez superado dicho umbral la roca pasa a ser una mezcla de granos en suspensión en un fluido, por lo tanto, la porosidad crítica define un límite entre el dominio consolidado y el no consolidado. Para tener en cuenta el estado de consolidación variable de la secuencia sedimentaria Dvorkin et al. (1999) modelan los parámetros de la matriz mezclando los de un medio granular calculados mediante la teoría de Hertz y Mindlin (Dvorkin et al. 1999), con porosidad fija e igual a la crítica, con los de un sólido puro en un extremo y con vacío en el otro extremo, definiendo dos rangos de porosidad.

Las ecuaciones de Hertz-Mindlin para el módulo de volumen y de corte del medio granular (pack de esferas) para porosidad igual a la crítica $\phi = \phi_c$ (es decir, cuando los sedimentos entran en contacto mecánico) y para una presión efectiva P_e, son:

$$K_{HM} = \left[\frac{n^2(1-\phi_c)^2 G^2}{18\pi^2(1-\upsilon)^2} P_e\right]^{1/3} \quad G_{HM} = \frac{5-4\upsilon}{5(2-\upsilon)}\left[\frac{3n^2(1-\phi_c)^2 G^2}{2\pi^2(1-\upsilon)^2} P_e\right]^{1/3} \tag{1}$$

Luego para $\phi_c \leq \phi \leq 1$, (estado no consolidado) los módulos de la matriz se calculan mediante la cota superior de Hashin y Shtrikman (1963), tomando como extremos los módulos del medio granular y el agua, en la forma:

$$K_{dry} = \left[\frac{\frac{1-\phi}{1-\phi_c}}{K_{HM} + \frac{4}{3}G_{HM}} + \frac{\frac{\phi-\phi_c}{1-\phi_c}}{\frac{4}{3}G_{HM}}\right]^{-1} - \frac{4}{3}G_{HM} \tag{2}$$

$$G_{dry} = \left[\frac{\frac{1-\phi}{1-\phi_c}}{G_{HM} + Z} + \frac{\frac{\phi-\phi_c}{1-\phi_c}}{Z}\right]^{-1} - Z, \text{ donde } Z = \frac{G_{HM}}{6}\left(\frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}}\right) \tag{3}$$

Para porosidad menor a la crítica $0 \leq \phi < \phi_c$ (estado consolidado) se combinan los módulos del medio granular y del sólido puro, tomando la cota inferior, resultando:

$$K_{dry} = \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{K_{HM} + \frac{4}{3}G_{HM}} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{K + \frac{4}{3}G_{HM}}\right]^{-1} - \frac{4}{3}G_{HM}, \text{y } G_{dry}$$
$$= \left[\frac{\frac{\phi}{\phi_c}}{G_{HM} + Z} + \frac{1 - \frac{\phi}{\phi_c}}{G + Z}\right]^{-1} - Z \quad (4)$$

A continuación, los módulos elásticos de la roca saturada con agua K_{sat}, G_{sat} se calculan mediante las ecuaciones de Gassmann (1951):

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{\left(1 - K_{dry}/K\right)^2}{\frac{\phi}{K_f} + \frac{(1-\phi)}{K} - \frac{K_{dry}}{K^2}}, \quad G_{sat} = G_{dry} \quad (5)$$

donde K_f es el módulo de volumen del fluido (agua de mar en este caso). La densidad de los sedimentos saturados se calcula a partir de la de los sedimentos ρ_{sed} (calculada con la densidad de los distintos minerales y sus fracciones volumétricas) y la del agua salada ρ_f en la forma

$$\rho = \phi\rho_f + (1 - \phi)\rho_{sed} \quad (6)$$

Utilizando las ecuaciones (5) y (6) se calcula la velocidad compresional V_p y se la compara con la medida y se estima la de corte V_s, ya que es un dato faltante.

Finalmente para el cálculo de las curvas de dispersión de velocidad de las ondas Scholte, se utiliza una adaptación de la rutina desarrollada por Herrmann (2013), la que admite un número de capas arbitrario, http://www.eas.slu.edu/People/RBHerrmann/ComputerPrograms. Además, es adecuada para el caso en estudio ya que permite realizar el cálculo teniendo en cuenta una capa de agua (lo que implica velocidad de corte nula), lo cual es imprescindible para este problema. Como parámetros de entrada, se requiere para cada capa especificar su espesor, las velocidades compresional y de corte y su densidad promedio. Para este análisis asumimos que no hay efectos de atenuación, aunque podrían introducirse especificando un factor de calidad para cada capa.

CALIBRACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LAS CURVAS DE DISPERSIÓN

Utilizando el modelo de física de rocas descripto en la sección anterior, la información de composición mineralógica y la densidad medida, aproximamos para cada profundidad el perfil sónico de velocidad de onda P, previamente suavizado mediante un filtro Savitzky-Golay, logrando así calibrar el modelo. En principio hicimos un ajuste teniendo únicamente en cuenta la diferenciación por unidades litológicas y luego, para alcanzar una mejor aproximación, agregamos una mayor cantidad de capas. Esto nos condujo a adoptar un esquema de 17 capas, el que se obtuvo variando la proporción de los minerales constitutivos dentro de valores razonables, de acuerdo con Mac Neil y Dugan (2016). De esta manera resultó un ajuste de las velocidades compresionales con un error medio cuadrático RMS de 6.71%, lo que se muestra en la Figura 2. También se obtuvo el perfil de velocidad de corte, observándose que las mismas son inferiores a la velocidad en el agua (caso *soft-bottom*). Estos perfiles de velocidad suavizados se tomarán como referencia para el análisis de sensibilidad posterior. Como paso siguiente, dado que el cálculo de las curvas de dispersión se basa en un modelo de subsuelo estratificado y lateralmente homogéneo, se procedió a segmentar dichos perfiles calculando promedios en cada capa, lo que se muestra en la Figura 3, donde además se incluyen los parámetros

del basamento. El objetivo de esta sección consiste en analizar paramétricamente el efecto de las variaciones en la densidad, variaciones de velocidades P y S y en la porosidad en el pozo estudiado, perturbando los valores de referencia. En todos los casos se mantienen fijos los parámetros del basamento y de la capa de agua de mar. Para cuantificar la sensibilidad de las velocidades de Scholte para cada frecuencia f, comparamos el valor resultante del modelo perturbado V_{SH}^{P} respecto del modelo original V_{SH} en la forma:

$$.S(f) = \left[\frac{V_{SH}^{P} - V_{SH}}{V_{SH}}\right] * 100\%$$

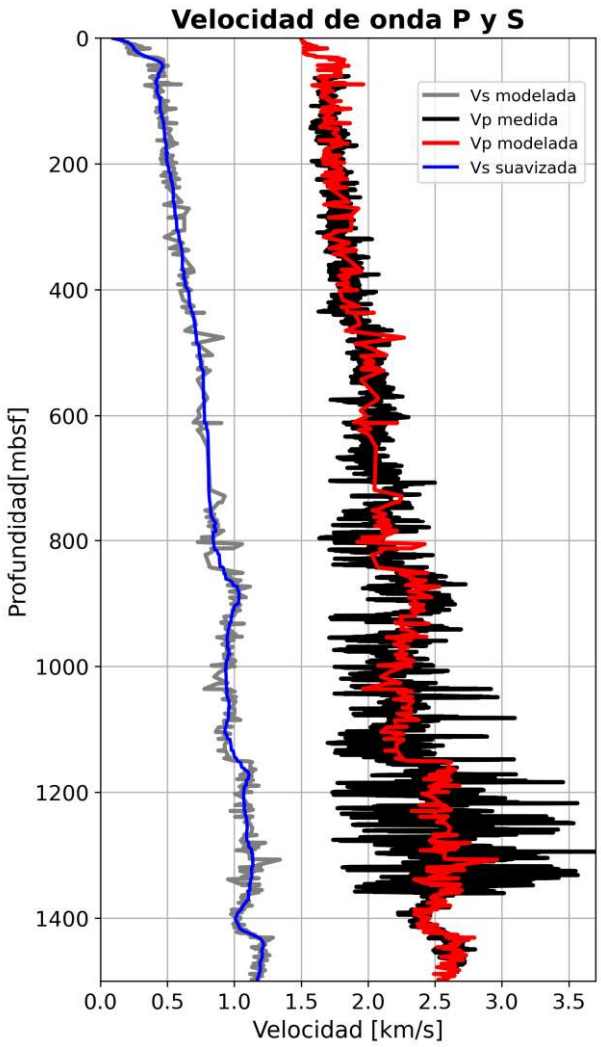


Figura 2. Velocidad compresional ajustada y velocidad de corte estimada.

Con respecto al rango de frecuencias adoptado para el análisis, el mismo se restringió al intervalo donde se observa variabilidad en las velocidades de Scholte, y abarca desde frecuencias sismológicas, ruido sísmico y hasta sísmica de exploración (0-100 Hz). Para frecuencias mayores la velocidad se estabiliza en un valor no dispersivo. Las longitudes de onda Scholte en el rango de frecuencias estudiado varían desde cientos de kilómetros hasta algunos metros, lo que nos dá una idea de las profundidades y espesores de influencia (Frivik, 1998).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

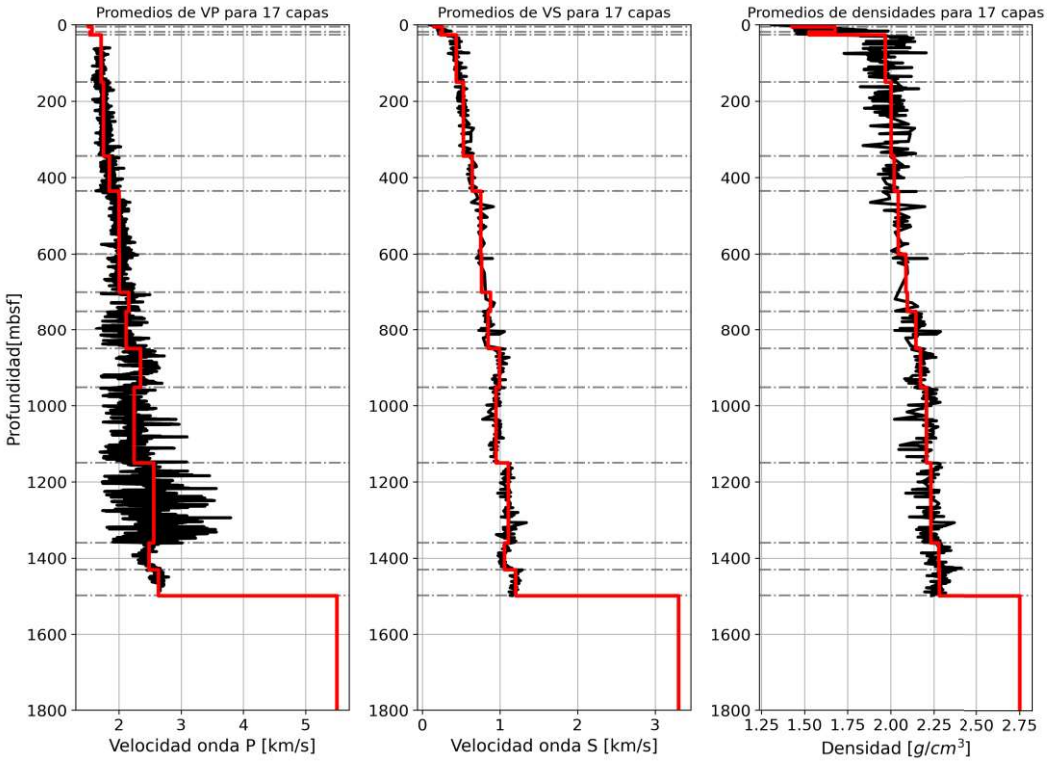


Figura 3. Perfiles de velocidad sónica de onda P (medido), de onda S (estimado) y de densidad. Con líneas rojas se ilustran los promedios para una segmentación en 17 capas y el basamento.

Sensibilidad a las variaciones de densidad

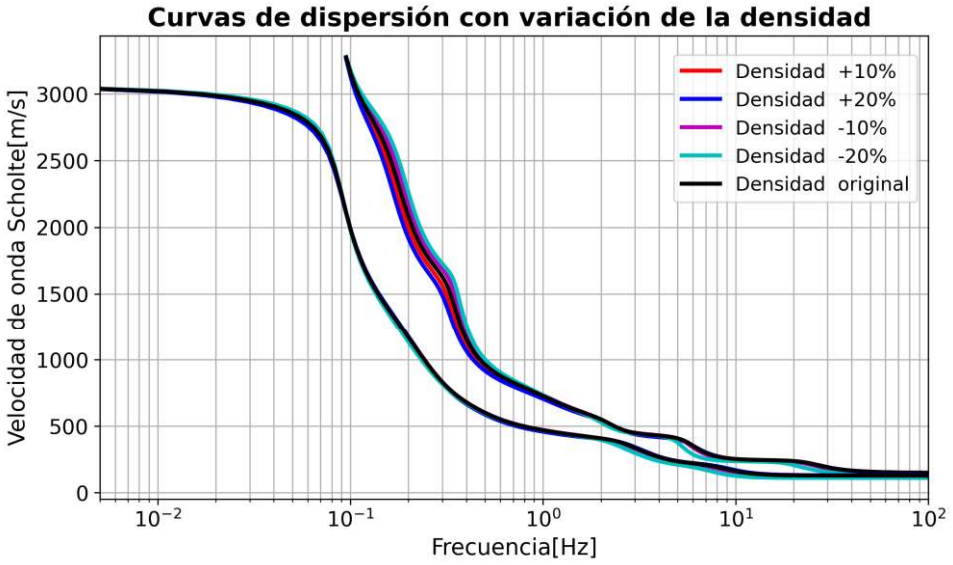


Figura 4. Curvas de dispersión de ondas Scholte para el modo fundamental y el superior variando las densidades de los sedimentos.

A continuación, tomando como referencia los valores del perfil de densidad medido en el espesor sedimentario, aplicamos variaciones de ±10%, ±20% y ±30% punto a punto del mismo y se observa el efecto en las curvas de dispersión, tanto en el modo fundamental como en el primer modo superior (dejando el resto de los parámetros invariantes), como se muestra en la Figura 3. Los apartamientos resultantes entre las curvas de dispersión

son muy pequeños en el rango de frecuencias analizado, siendo más notable para las variaciones de densidad del 20%, tanto positivas como negativas.

Sensibilidad a las variaciones de la velocidad compresional

Seguidamente, variamos el perfil de velocidad de onda P de la capa sedimentaria, en los mismos porcentajes mencionados anteriormente, manteniendo el resto de los parámetros fijos. Las curvas de dispersión resultantes se muestran en la Figura 4. En este caso los resultados muestran una sensibilidad relativa menor al 10% para la fundamental y menor a 20% para el modo superior, en frecuencias alrededor de 0.5 Hz. Se observa además que a medida que la velocidad de onda P aumenta, la velocidad de la onda Scholte también lo hace, mostrando una correlación débil pero directa.

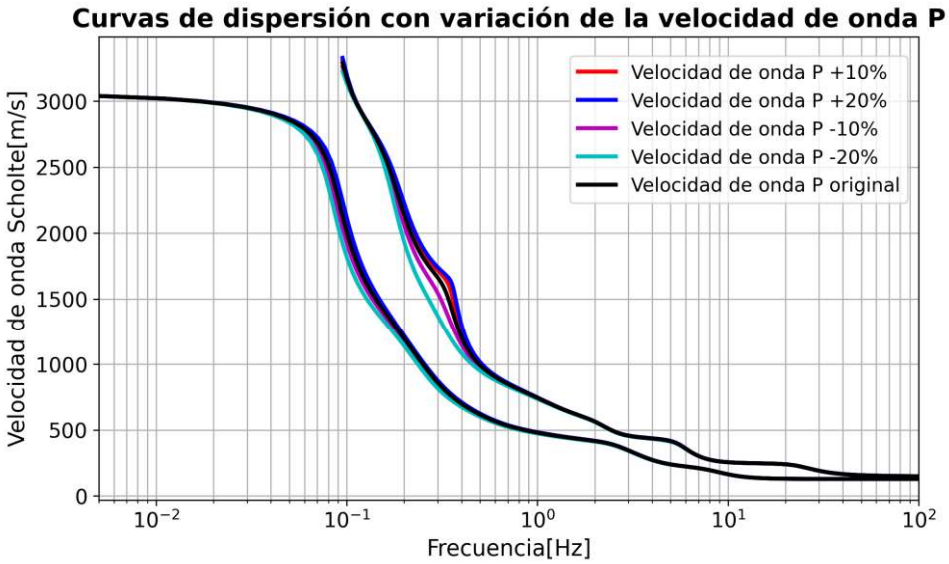


Figura 5: Curvas de dispersión de ondas Scholte para el modo fundamental y primer modo superior variando las velocidades compresionales.

Sensibilidad a las variaciones de la velocidad de corte

Uno de los temas de mayor interés práctico consiste en observar las correlaciones entre las velocidades de Scholte y las de ondas de corte. Con esta motivación, aplicamos las mismas variaciones, esta vez para las velocidades de onda S en los sedimentos. Las curvas de dispersión del modo fundamental y el superior se muestran en la Figura 6. Como se observa a simple vista, la velocidad de la onda Scholte es más sensible a variaciones de V_s que a variaciones de V_p de densidad, alcanzando variaciones relativas del orden de ±30% en una banda ancha de frecuencias. Como en las figuras previas vemos que, al no variar las propiedades del basamento, las frecuencias bajas no se ven perturbadas. Por otra parte, a medida que aumenta la velocidad de onda S, aumenta la velocidad de onda Scholte y viceversa. Esto confirma la conocida correlación fuerte y directa entre velocidades de Scholte y velocidades de corte.

Sensibilidad a las variaciones de porosidad y ley de compactación

En este punto nos proponemos perturbar el perfil de porosidad medido en el espesor sedimentario para cada profundidad, lo que implica variar simultáneamente los parámetros elásticos, la densidad y por ende, V_p, V_s. Nuevamente, aplicamos variaciones tanto negativas como positivas a las porosidades y los resultados se muestran en la Figura

7. Las mayores variaciones se dan para frecuencias mayores a 0.1 Hz, siendo en este caso muy notorias, alcanzando valores mayores a ±50%.

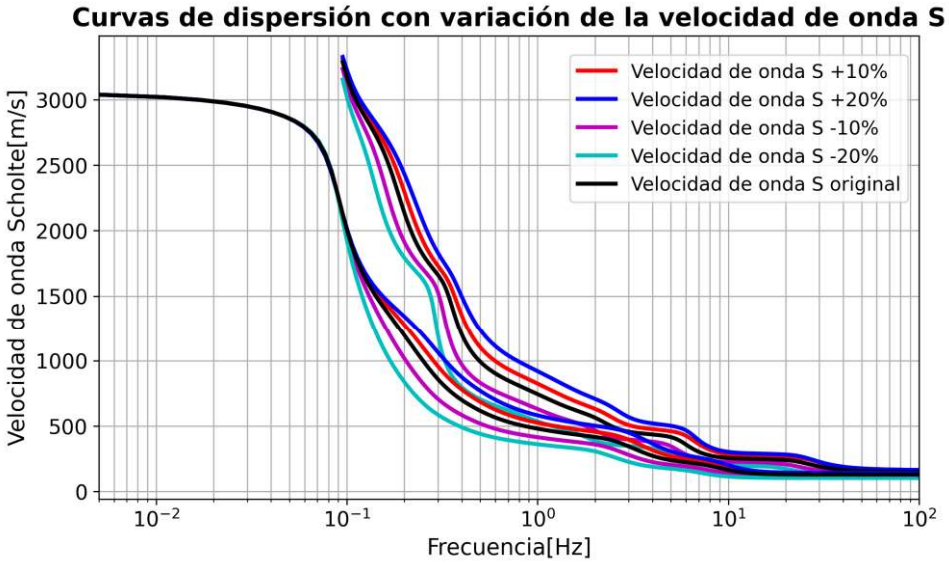


Figura 6. Curvas de dispersión de ondas Scholte para el modo fundamental y primer modo superior variando las velocidades de corte.

En las curvas se aprecia que a mayores porosidades la velocidad de onda Scholte es menor, para todas las frecuencias. En base a los análisis precedentes llegamos a la conclusión de que esto se debe a la fuerte sensibilidad de la velocidad de Scholte a la velocidad de corte. A mayor porosidad de los sedimentos ambas velocidades decrecen, pero la de mayor influencia es la velocidad de onda S.

En relación a la porosidad y sus variaciones verticales, distintos autores han observado que en ambientes sedimentarios la relación entre porosidad y profundidad z (por debajo del fondo), exhibe un decaimiento exponencial y dependiente de la litología, siendo el trabajo de Athy (1930) el pionero en este campo. Dicho decaimiento es la principal manifestación de los efectos de compactación sufridos por los sedimentos durante su diagénesis. Siguiendo a Kominz et al. (2011), en lugar de utilizar los valores de porosidad medidos en el pozo, vamos a realizar un ajuste exponencial de la forma

$$\phi = \phi_0 e^{-(z/\alpha)} \tag{7}$$

De este modo analizaremos si las velocidades de Scholte son sensibles a las variaciones en la constante α. En el ajuste realizado utilizando los datos se obtuvo: $\phi_0 = 51.79\%$ y $\alpha = 2153m$, con un coeficiente de correlación entre los valores medidos y ajustados de 0.77.

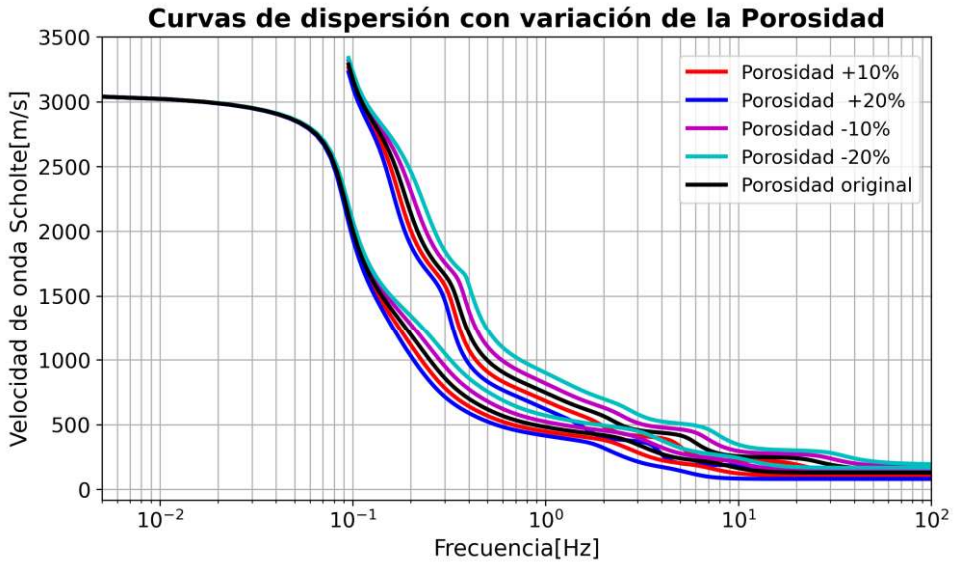


Figura 7. Curvas de dispersión para porosidades variables.

Una vez obtenido el ajuste exponencial, calculamos las velocidades de onda P y onda S mediante el modelo de física de rocas y calculamos los promedios para los 17 intervalos de profundidad utilizados. Aplicamos variaciones a la constanteα tanto negativas como positivas y repetimos el procedimiento anterior, para así obtener las curvas de dispersión y compararlas con la original. Esto se muestra en la Figura 8.

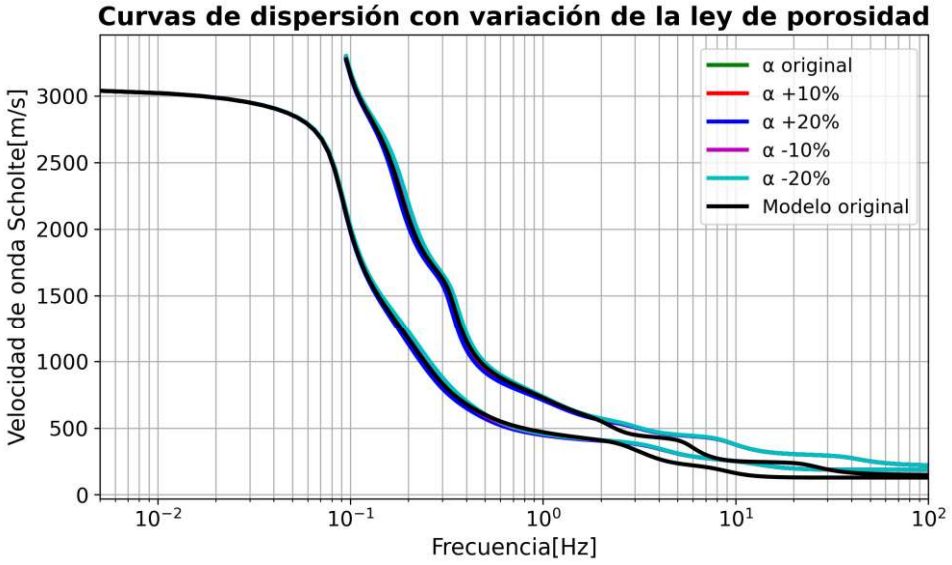


Figura 8. Curvas de dispersión de ondas Scholte considerando un ajuste exponencial de la porosidad y variaciones en la constante de decaimiento con la profundidad.

Como podemos ver, no se aprecian diferencias significativas variando la constante de decaimiento del perfil de porosidad, efecto que no había sido estudiado hasta el momento y que indicaría la dificultad de su estimación mediante el análisis de curvas de dispersión de ondas Scholte.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos abordado la implementación de un modelo de física de rocas para el cálculo de las propiedades elásticas de las rocas sedimentarias poco consolidadas de la

corteza oceánica, el ajuste de las velocidades de propagación de ondas P, la predicción de las velocidades de onda S y el cálculo y análisis de las curvas de dispersión de ondas Scholte en un pozo de estudio. El trabajo implicó una tarea de búsqueda y recopilación de datos de dominio público, habiéndose adoptado los adquiridos en los pozos U1480–U1481 durante la campaña 362 del programa IODP en la zona del Golfo de Bengala (Océano Índico). Como datos de entrada se utilizaron las mediciones de densidad, porosidad, fracciones mineralógicas y espesores de la secuencia sedimentaria. Además, las propiedades físicas del basamento basáltico, del agua de mar y su profundidad.

A partir del modelo calibrado mediante ajuste de las velocidades de ondas P, se realizaron diversos análisis de sensibilidad de las velocidades de ondas Scholte y sus curvas de dispersión, en un rango de frecuencias que abarca ondas sismológicas, ruido sísmico y fuentes sísmicas de exploración. Las principales conclusiones de este estudio se sintetizan a continuación:

- La velocidad de la onda Scholte en el límite de bajas frecuencias (como las generadas por fuentes naturales), es controlada por las propiedades del basamento, tanto para el modo fundamental como para el primer modo superior.
- Las variaciones en la densidad de los estratos sedimentarios producen cambios leves pero detectables siendo el modo superior más sensible a este parámetro.
- La sensibilidad de la velocidad de Scholte ante cambios de velocidad de onda S (como se espera) es mucho más marcada en comparación a la de la onda P, teniendo correlación directa con ambas para todo el rango de frecuencias.
- Con respecto a la porosidad, observamos una alta sensibilidad de la velocidad de onda Scholte a la misma para ambos modos, observándose una correlación inversa entre ambas magnitudes. Esto se interpreta principalmente debido al decaimiento de la rigidez del medio con el aumento de porosidad.
- Sin embargo, no se observa sensibilidad apreciable respecto de la constante de decaimiento del perfil de porosidad dentro del rango estudiado, lo que haría difícil inferir la ley de compactación mediante análisis de ondas Scholte.

A partir de este análisis concluimos que los parámetros críticos en este problema son: las velocidades de corte, la porosidad de los sedimentos y las propiedades del basamento (para muy bajas frecuencias). Por otro lado, cabe mencionar que las características de la estratificación (número de capas y espesores) también son de gran influencia, lo que fué estudiado en detalle por Varela (2021) pero no se incluyó en este trabajo por brevedad. Los análisis realizados para la parametrización descripta permiten pensar en la factibilidad de formular problemas inversos. En efecto, teniendo en cuenta las longitudes de onda involucradas en el rango de frecuencias estudiado se infiere que además de velocidades de corte y espesores, también podrían estimarse perfiles de porosidad a escalas de observación adecuadas para la caracterización mecánica del fondo oceánico.

Cabe remarcar que, si bien los modelos analizados son muy simples, dan información cuantitativa del comportamiento esperable de las velocidades estudiadas ante los diferentes parámetros estudiados. Se espera a futuro ampliar la validez de estas conclusiones utilizando datos de otros pozos y en lo posible, analizando curvas de dispersión de ondas Scholte obtenidas a partir de datos reales.

REFERENCIAS

Athy, L. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 14, 1–24, (1930).

Ballard, M., and Lee, K. The acoustics of marine sediments. Acoustics Today 13, 3, 2081–2092 (2003).

Brocher, T. M. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's Crust. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 6, pp. 2081–2092,

Dong, Y., Piao, S., Gong, L., Zheng, G., Iqbal, K., Zhang, S., Wang, X. Scholte Wave Dispersion Modeling and Subsequent Application in Seabed Shear-Wave Velocity Profile Inversion. J. Mar. Sci. Eng. 9, 840, (2021).

Dvorkin, J., and Prasad, M. Elasticity of marine sediments: Rock physics modeling. Geophysical Research Letters 26, 1781–1784 (1999).

Frivik, S. A. Determinationn of Shear Properties in the Upper Seafloor Using Seismo-acoustic Interface Waves. IEEE Oceanic Engineering Society, 1998.

Gassmann, F. Über die elastizitat poroser medien. Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gessellshaft in Zurich 96, 1–23, (1951).

Hashin, Z., and Shtrikman, S. A variational approach to the elastic behavior of multiphase materials. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 11, 2, 127– 140, (1963).

Herrmann, R. B. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. Seismological Research Letters 84, 1081–1088, (2013).

Hovem, J. Shear waves in marine sediments. Springer Science Media, 1991.

Kominz, M. and Odette, D. Lithology dependence of porosity in slope and deep marine sediments. Journal of Sedimentary Research 81 (2011), 730–742, (2011).

Kugler, S., Bohlen, T., Forbriger, T., Bussat, S., and Klein, G. Scholte-wave tomography for shallow-water marine sediments. Geophysical Journal 168, 2, 551–570 (2007).

McNeill, L. C., and Dugan, B. Expedition 362 scientific prospectus: the Sumatra Subduction Zone. International Ocean Discovery Program, 2016.

Madrussani, G., Rossi, G., Rebesco, M., and Picotti, S. Sediment properties in submarinemass-transport deposits using seismic and rock-physics off NW Barents Sea. Marine Geology 402, 264–278, (2018).

Scholte, J. G. The range of existence of Rayleigh and Stoneley waves. Geophysical Journal International 5, 120–126 (1947).

Varela María Florencia, Ravazzoli, Claudia L., Mercerat, Diego, Análisis de velocidades de ondas P, S y de interfase en sedimentos marinos mediante modelos de física de rocas. 29º Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Libro de Resúmenes 217 – 218, (2021).

Varela, M. F., Modelado elástico y análisis paramétrico de velocidades de ondas de interfase en sedimentos marinos. Tesis de Grado en Geofísica, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, (2021). http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/132669

Wu, Hua, Guang-Zhou Shao and Qing-Chun Li, Study of Scholte wave dispersion curves and modal energy distribution using a wavefield numerical simulation method. Exploration Geophysics, 49, 372–385, (2018).

ACCIÓN DEL FUEGO SOBRE LAS PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS DEL HORMIGÓN ARMADO COMO MATERIAL COMPUESTO

Marianela Ripani[a,b], Illarick Balarezo[a], Hernan Xargay[a,b,c], Paula Folino[a,b]

[a] *Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería (LMNI-LAME), Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.*

[b] *Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN), CONICET - Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*

[c] *ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), ARGENTINA*

e-mail: mripani@fi.uba.ar

RESUMEN

La acción del fuego suele tener efectos devastadores sobre las estructuras civiles. Sin embargo, este efecto puede variar en función de diversas variables que dependen no solo de las características del incendio sino también del tipo de estructura y de las propiedades fisico-mecánicas de los materiales que la componen. En el caso particular de las estructuras de hormigón armado se combina la respuesta de dos materiales: el hormigón y las barras de acero. En general, el hormigón tiene una buena respuesta frente a la acción de las altas temperaturas, ya que, en comparación con el acero, posee una conductividad térmica mucho menor. Por este motivo, suele considerarse al hormigón como protector de las barras de acero y los reglamentos, en los niveles más sencillos de diseño, establecen recubrimientos mínimos de hormigón. No obstante, el hormigón puede sufrir una degradación severa de sus propiedades fisico-mecánicas frente a la acción del fuego, dependiendo principalmente de la temperatura alcanzada y de los gradientes térmicos originados en la masa del hormigón. En este trabajo se presenta un análisis de la degradación de las propiedades fisico-mecánicas del hormigón y del acero frente a la acción de las altas temperaturas. Los datos analizados son extraídos de la bibliografía científica y de las disposiciones reglamentarias vigentes.

Palabras Clave: Fuego, Hormigón Armado, Propiedades Fisico-Mecánicas, Altas Temperatura

INTRODUCCIÓN

El incendio es considerado uno de los fenómenos accidentales o intencionales más destructivos, con capacidad de dañar tanto vidas como bienes materiales. Particularmente, el incendio de un edificio es una combustión no controlada, donde existe interacción entre el diseño arquitectónico y estructural del edificio, las personas que lo ocupan y el medio ambiente que lo rodea. Como consecuencia de la combustión surge el fuego, que es una rápida oxidación de los materiales combustibles, como es el caso del hormigón, liberando energía en forma de llamas. Actualmente, el hormigón es considerado el material estructural más empleado en construcciones civiles tales como, edificaciones, puentes, silos, túneles, entre otros. Esto se debe a las grandes ventajas que presenta en cuanto a constructibilidad, trabajabilidad, durabilidad y resistencia termo-mecánica.

En cuanto a la filosofía del diseño estructural contra incendios se establece como objetivo principal salvaguardar la vida de los ocupantes del edificio, asegurando el correcto funcionamiento de los medios de escape y la estabilidad de la estructura resistente durante el tiempo suficiente para llevar a cabo el desalojo. Otro objetivo, de orden secundario, es

la posibilidad de la edificación de continuar en funcionamiento después de la acción fuego.

El estudio del fenómeno del fuego sobre las estructuras se basa en tres pilares fundamentales: (1) el conocimiento de la naturaleza del fuego y de las leyes que rigen su evolución, (2) la evaluación de las leyes de conducción, difusión y radiación térmica dentro del compartimento afectado con el fin de determinar la temperatura de cada uno de los materiales que lo componen, (3) la determinación de la repuesta termo-mecánica de la estructura en función de la temperatura alcanzada por el material, de las cargas actuantes y de las condiciones estáticas de vinculación.

En particular, las principales normativas que contemplan el diseño, ejecución y cálculo de estructuras de hormigón armado, tal es el caso del Eurocódigo (CEN 2004a) y de la norma americana ACI (ACI 216), establecen requisitos mínimos de integridad, estanqueidad y resistencia para garantizar la seguridad de las obras civiles frente a un incendio. El cumplimiento de dichos requerimientos es evaluado a través de ensayos o métodos experimentales establecidos principalmente en las normas ISO 834 (1999), UL 263 (2003), ASTM-E119 (2005), NFPA-251 (2006), entre otras. En efecto, estos ámbitos reglamentarios exigen que los elementos estructurales de las edificaciones ofrezcan una resistencia al fuego que se mide en minutos, y con requerimientos diferenciados según el tipo de elemento y la utilización del edificio (Macari Lagos, R., 2015). Dentro de los análisis de las diferentes normativas, se encuentran diferentes hipótesis en sus métodos simplificados para verificar estructuras debido a la acción al fuego. Por ejemplo, la norma brasileña ABNT NBR 15200 (ABNT NBR 15200, 2012) menciona que los esfuerzos resistentes de una sección sometida a flexión pueden ser calculados adoptando una resistencia reducida media para los materiales a temperatura elevada, considerando una distribución uniforme de la temperatura en la zona comprimida de hormigón, y una pérdida total de la resistencia de las barras de armaduras que se encuentran más allá de un cierto umbral de temperatura elevada (Albuquerque, G., 2012). Las normas mencionadas, utilizan curvas de fuego estándar para representar la acción de un fuego confinado sobre una estructura, estableciendo la variación de la temperatura en función del tiempo dentro de un horno de ensayos.

En la actualidad, este tipo de ensayos se realizan, en gran parte, a través de la mecánica computacional, donde se emplean herramientas numéricas como los elementos finitos, entre otras. Es evidente que los ensayos computacionales no podrían suplantar en su totalidad a los ensayos experimentales. Su uso se fundamenta en las ventajas que presentan desde el punto de vista económico y de la facilidad de implementación. Los ensayos computacionales permiten, además, efectuar una infinidad de predicciones, bajo diversas condiciones de borde y de acciones, partiendo de la calibración de un modelo numérico con una acotada cantidad de ensayos experimentales.

Para realizar las predicciones y evaluaciones mencionadas anteriormente, es menester que el profesional a cargo de la seguridad contra incendios posea un minucioso conocimiento de las propiedades termo-mecánicas del material estructural, tales como conductividad térmica, calor especifico, resistencia y deformación bajo alta temperatura, entre otras. Además, en el caso particular del hormigón aparecen diversos efectos secundarios, como el descascaramiento explosivo de las superficies de los elementos estructurales o "*spalling*" frente a la acción del fuego, lo cual compromete seriamente la integridad estructural al dejar expuestas las armaduras de acero, además de representar una acción altamente peligrosa contra la vida de los ocupantes.

MÉTODOS EXPERIMENTALES

Como se mencionó previamente, para evaluar las propiedades físico-mecánicas de los materiales estructurales como el hormigón armado, resulta crucial conocer el comportamiento real del fuego que actúa sobre ellos. No obstante, en la mayoría de los casos, se suele representar la evolución del fuego a través de curvas tiempo-temperatura estándar. Como es de esperarse, dichas curvas difieren un poco de la evolución real de un fuego natural. Por ejemplo, no consideran la fase inicial del desarrollo del fuego antes del punto de inflamación o flashover. Esto puede verse claramente en la Figura 1.a. La curva de fuego estándar más ampliamente utilizada por diferentes normativas internacionales de diseño estructural es la curva tiempo-temperatura ISO-834, que se muestra en la Figura 5.b. Dicha curva está basada en un fuego celulósico estándar que presenta un aumento de temperatura relativamente lento y cuyo combustible puede ser madera, papel, tela, entre otros (Khoury, G. A, 2000). En contraposición, pueden verse también en la Figura 1.b. las curvas paramétricas de tiempo-temperatura RABT, RWS y HC. La curva RABT es utilizada frecuentemente cuando se trata de fuegos provocados por vehículos, tales como automóviles o trenes. Presenta un rápido aumento de la temperatura y alcanzando un máximo de 1200°C. La curva RWS (Rijkswaterstaat) se utiliza para el diseño estructural de túneles. Esta curva alcanza los 1350°C después de 60 minutos y desciende gradualmente a 1200°C después de 120 minutos. Las curvas HC (HydroCarbon Eurocode 1 y Modified HydroCarbon French) corresponden a fuegos asociados a combustibles petroquímicos.

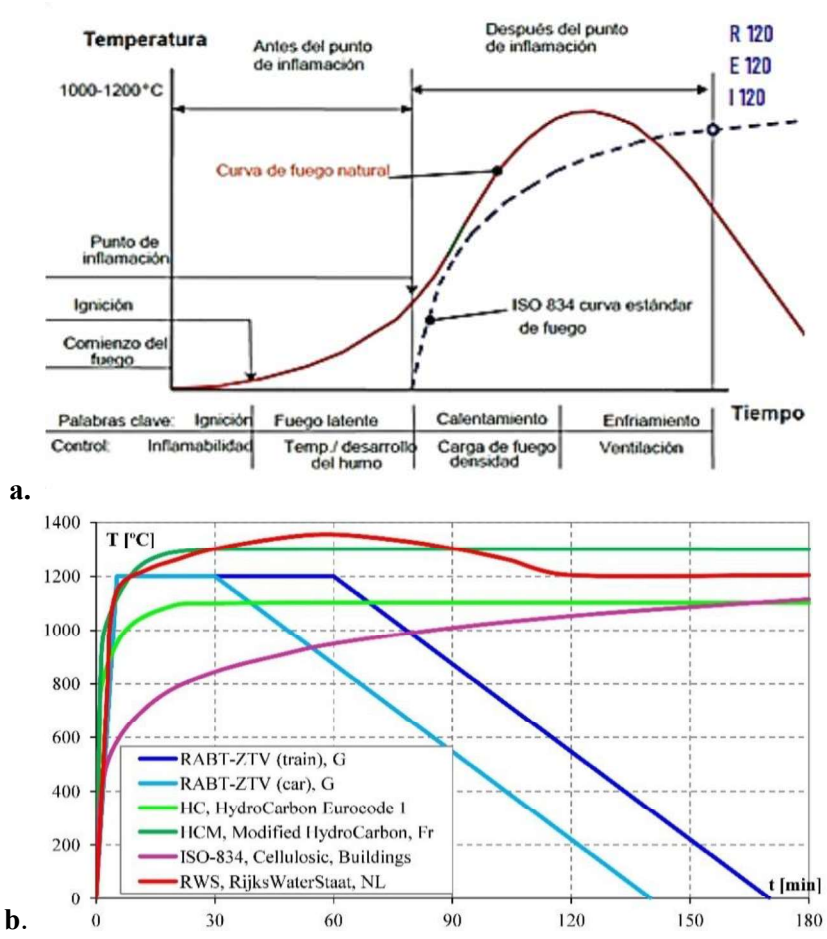


Figura 1. a. Comparación entre la curva ISO 834 y una curva de fuego real (GRIIE, 2010). **b.** Curvas de fuego paramétricas (PROMAT, 2020).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Una vez determinada la acción térmica, es decir, la curva de fuego (temperatura vs tiempo), se deben ejecutar diversos tipos de ensayos experimentales termo-mecánicos para la determinación de las propiedades materiales bajo los efectos de las altas temperaturas. Para el caso del hormigón, estos ensayos pueden dividirse en tres grandes grupos, dependiendo del momento de aplicación de la temperatura y de la carga mecánica. Dicha clasificación resulta en (1) ensayos residuales, donde el espécimen es calentado hasta una cierta temperatura, mantenido en caliente durante un tiempo determinado, enfriado hasta llegar a temperatura ambiente y finalmente ensayado mecánicamente, (2) ensayos en caliente en régimen transitorio, donde el espécimen es precargado a temperatura ambiente hasta un valor de carga preestablecido y luego es calentado progresivamente hasta la falla y (3) ensayos en caliente en régimen no transitorio, donde el espécimen es calentado hasta una cierta temperatura, y luego cargado hasta la falla mientras la temperatura se mantiene constante. A continuación, en la Figura 2 se muestran esquemáticamente las diferentes metodologías de ensayos experimentales explicadas anteriormente.

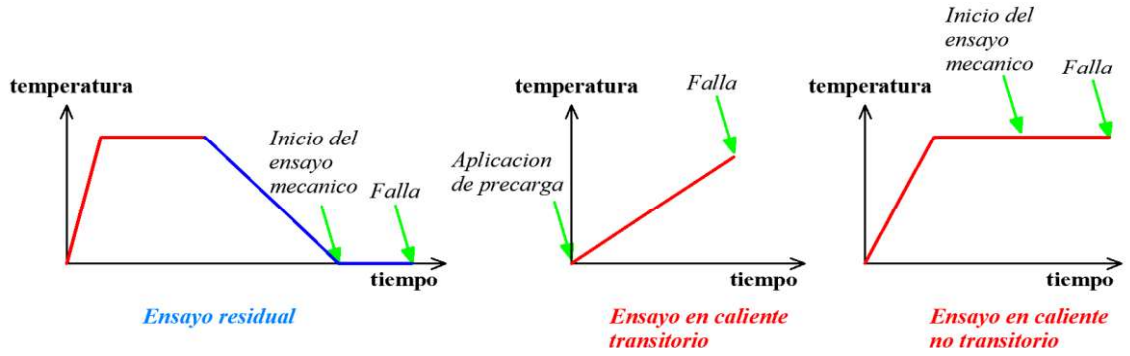


Figura 2. Tipos de ensayos termo-mecánicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

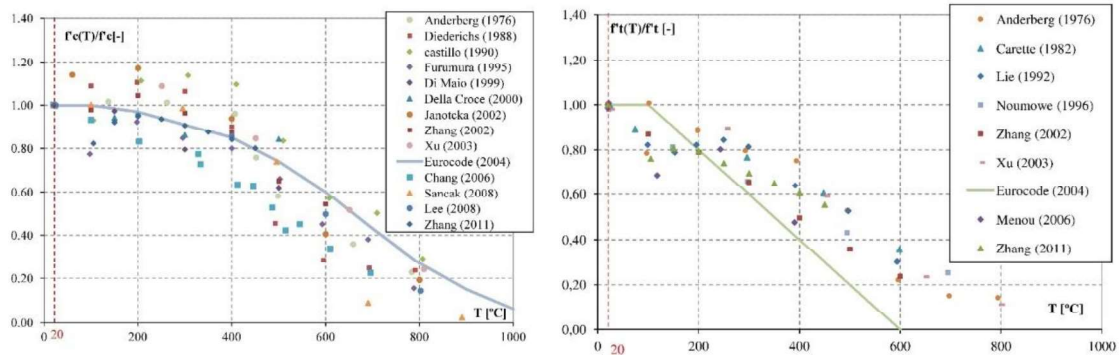
En base a las metodologías de ensayos previamente descriptas pueden encontrarse en la literatura numerosos resultados experimentales y propuestas normativas referentes de la variación de las propiedades fisico-mecánicas del hormigón y del acero sujetos a diferentes niveles de temperaturas elevadas, es decir, a temperaturas mayores a 100ºC. A continuación, se presentan los resultados más relevantes de la literatura científica y algunas de las propuestas de las normativas para las propiedades tanto del hormigón como del acero.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y A TRACCIÓN UNIAXIAL DEL HORMIGÓN

Se acepta que la resistencia a compresión uniaxial de un hormigón de resistencia normal no se vea afectada por el aumento de la temperatura hasta aproximadamente los 200ºC. Incluso, se ha observado que para temperaturas menores a 200ºC la resistencia puede aumentar levemente. Esto se debe a la rehidratación de algunas partículas de cemento, originalmente no hidratadas, producto de la evaporación y migración del agua libre presente en los poros del hormigón. Este efecto aparentemente beneficioso, no es considerado en las normativas al momento de definir la variación de la resistencia a compresión en función de la temperatura. En la Figura 3.a se muestran resultados de ensayos experimentales de compresión uniaxial en hormigones sometidos a diferentes niveles de temperatura que fueron publicados por distintos autores. Los resultados están dados en términos de la resistencia a una cierta temperatura elevada, respecto de la resistencia a temperatura ambiente. En la misma figuran se muestra en línea llena la

 ISBN: 978-987-1323-89-0

propuesta del Eurocódigo para dicha variación (Ripani, 2016). Por otra parte, en la Figura 3.b puede verse como varía la relación entre la resistencia a tracción uniaxial a temperaturas elevadas respecto de la misma a temperatura ambiente, para hormigones de resistencia normal según resultados experimentales publicados por distintos autores en la literatura científica. En contraposición, se muestra en la Figura 3.b, la propuesta del Eurocódigo (CEN 2004a). Comparando las Figuras 3.a y 3.b puede notarse claramente que la pérdida de resistencia es más marcada para el caso de la resistencia a tracción que para el de la resistencia a compresión cuando las temperaturas son elevadas.



a. **b.**

Figura 3. Degradación de la resistencia **a.** a la compresión y **b.** a la tracción del hormigón a temperaturas elevadas.

En la Figura 4 se muestran los resultados extraídos del trabajo de Zawadowska et al. (2021), donde se realizaron ensayos experimentales de compresión uniaxial transitorios y no transitorios sobre probetas cilíndricas de hormigones de resistencia normal. Los resultados están dados en términos de resistencia a una temperatura dada respecto de la misma a temperatura ambiente. Dichos resultados se comparan en la misma figura con curvas propuestas por otros autores (Zawadowska et al., 2021) y por el Eurocódigo (CEN, 2004a) para la degradación de la resistencia a compresión uniaxial en ensayos residuales. Cabe destacar que las denominaciones NTR_500 y NTR_455 se refieren a ensayos realizados en régimen no transitorio donde la temperatura fue mantenida en 500 y 455ºC, respectivamente; mientras que TR_40, TR_50 y TR_60 se refieren a ensayos realizados en régimen transitorio con aplicación de precargas del 40, 50 y 60% de la carga de falla del hormigón a compresión uniaxial. Cabe señalar que, en los ensayos realizados en régimen transitorio, las temperaturas máximas alcanzadas para la falla son menores que las temperaturas de los mismos ensayos en régimen no transitorios.

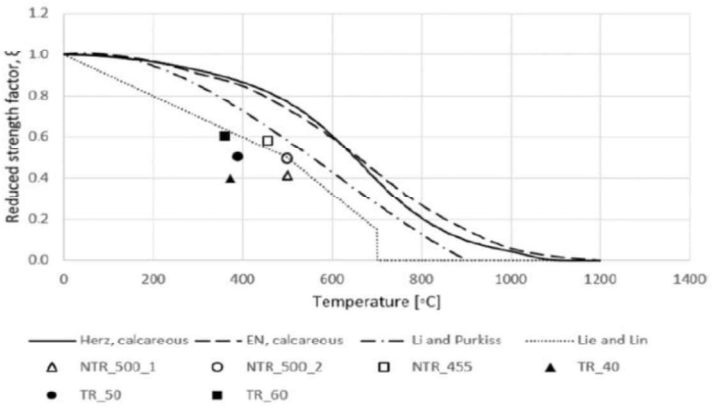
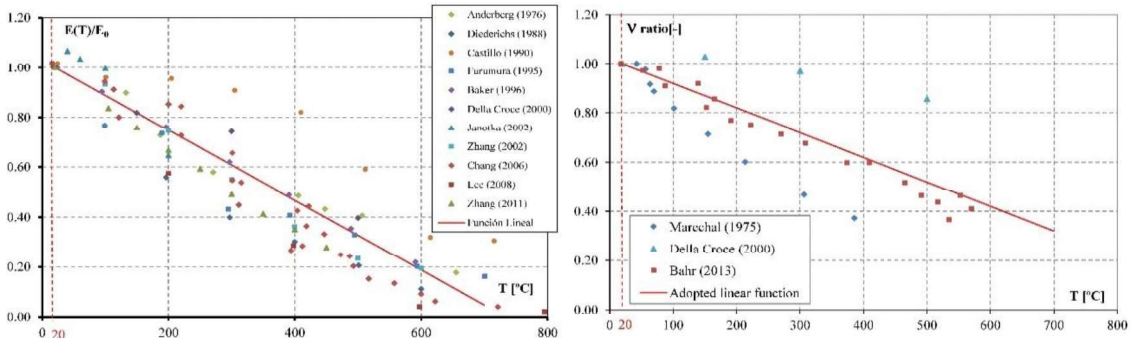


Figura 4. Comparación entre los resultados del ensayo de compresión uniaxial en caliente, transitorios y no transitorios, en hormigones de resistencia normal (Zawadowska et al., 2021).

RIGIDEZ DEL HORMIGÓN

Se acepta como válido que, en hormigones de resistencia normal, la degradación del módulo de Young se incremente linealmente con el aumento de la temperatura, llegando a valores limites en 700ºC, donde tiende a ser nulo. En la Figura 5.a se muestran resultados experimentales de la relación entre el módulo de Young a una cierta temperatura (E_T) respecto de su valor a temperatura ambiente (E_0), extraídos de la literatura científica. En contraposición, se presenta en el mismo gráfico, una aproximación lineal para la degradación de E_T, dada por la expresión $E_T = E_0(1 - \alpha_E T)$, donde E_0 es el módulo de elasticidad a 20ºC y $\alpha_E = 0.0014$ (Ripani, 2016). Respecto al coeficiente de Poisson, si bien existe menor información acerca de su variación con la temperatura, la evidencia experimental disponible en la literatura sugiere que, al igual que el módulo de Young, el coeficiente de Poisson se reduce linealmente con el aumento de la temperatura, llegando a valores de aproximadamente un 40% de su valor original a temperaturas de alrededor de 600ºC, como puede verse en la Figura 5.b (Ripani, 2016). Cabe destacar que, cuando se somete al hormigón a altas temperaturas, la degradación de la rigidez es mucho más significativa que la pérdida de resistencia a compresión.



a. **b.**

Figura 5. Resultados experimentales para la degradación del **a.** Modulo de Young, y del **b.** Coeficiente de Poisson para hormigón en ensayos no transitorios (Ripani, 2016).

En cuanto a la deformación del hormigón frente a la acción combinada de cargas mecánicas y altas temperaturas, se acepta que la deformación total ε se divide en: (1) deformación térmica $\varepsilon_{th}(T)$, (2) deformación mecánica $\varepsilon_{\sigma}(\sigma, T)$, (3) deformación por fluencia lenta o creep $\varepsilon_{cr}(\sigma, T, t)$ y (4) deformación transitoria $\varepsilon_{tr}(\sigma, T)$, donde σ se refiere a las acciones mecánicas, T a la temperatura y t al tiempo. La deformación ε_σ está relacionada con el esfuerzo debido a la aplicación de cargas a una temperatura dada. En la Figura 6 pueden verse varias curvas tensión vs deformación para un hormigón de resistencia normal sometido a diferentes niveles de temperaturas elevadas (Khodur, 2014). La deformación ε_{th} resulta de la expansión libre del hormigón y depende tanto de la temperatura como del tipo de agregado grueso del hormigón (silíceo, calcáreo o liviano), como puede verse en la Figura 7.a. La deformación por creep (ε_{cr}) es la deformación a largo plazo bajo carga constante. En la mayoría de los casos, al eliminarse la carga, las deformaciones por creep se recuperan lentamente. Cuando las temperaturas son elevadas, la deformación ε_{cr} se ve incrementada. Sin embargo, considerando que la exposición al fuego suele ser una situación transitoria, la contribución de la deformación ε_{cr} dentro de la deformación total resulta insignificante y no suele considerarse por las normativas (CEN 2004a). Finalmente, ε_{tr} es la deformación que surge del incremento paulatino de la temperatura, en un espécimen previamente cargado. Esta deformación que se da como consecuencia de los cambios físicos y químicos en el hormigón, no juega un

rol relevante dentro de la deformación total, pero su efecto es mayor a medida que aumenta el tiempo de exposición. En la práctica, no es posible medir solo la parte transitoria de la deformación total en un ensayo experimental, pero podría calcularse como la diferencia entre la expansión térmica de un espécimen calentado sin carga mecánica y la deformación del mismo espécimen precargado y luego calentado hasta una cierta temperatura. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 7.b, donde la diferencia de ordenadas entre los resultados de los ensayos mencionados corresponde a las deformaciones LITS (load-induced thermal strain).

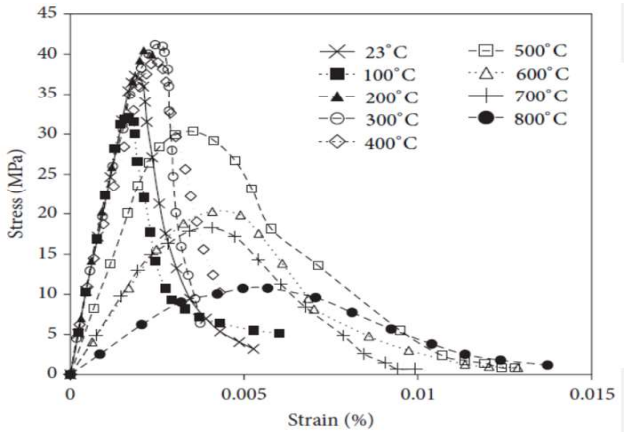
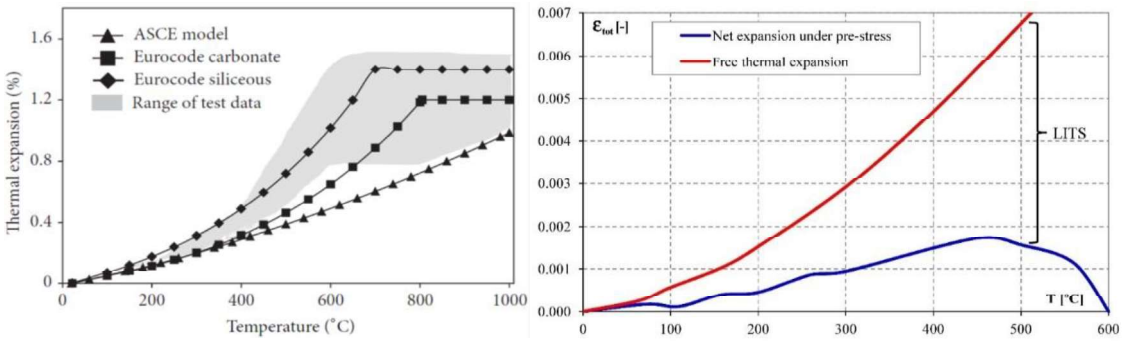


Figura 6. Curvas tensión deformación de un hormigón de resistencia normal en altas temperaturas (Khodur, 2014).



a. **b.**

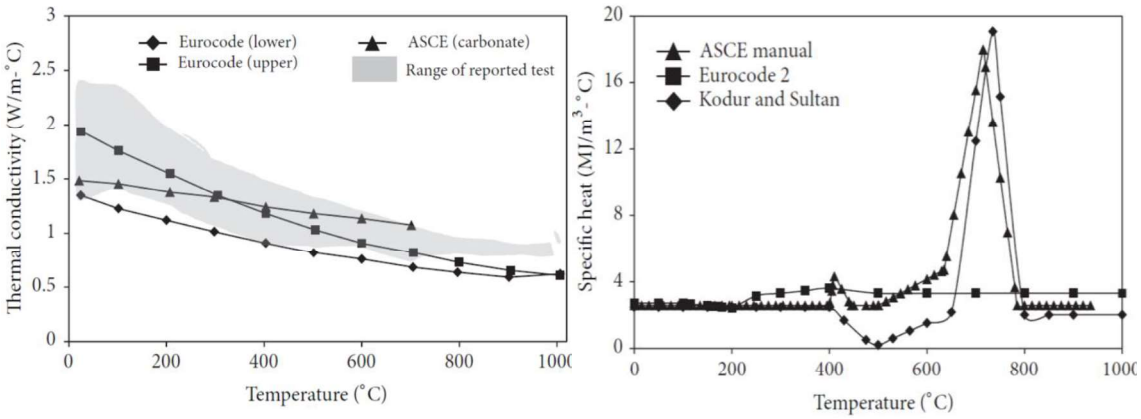
Figura 7. a. Expansión térmica libre (Khodur, 2014) y **b.** deformaciones transitorias (Ripani, 2016) en hormigones de resistencia normal sujetos a altas temperaturas.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y CALOR ESPECÍFICO DEL HORMIGÓN

La conductividad térmica del hormigón varia principalmente con el contenido de humedad y con el tipo de agregado grueso. Cuanto mayor es el contenido de humedad presente en la red de poros del hormigón, menor es su conductividad térmica. Esta propiedad también se ve afectada por las condiciones y las técnicas de medición empleadas durante el ensayo. Estas consideraciones son igualmente válidas para el hormigón en condiciones de altas temperaturas. El Eurocódigo (CEN 2004a) establece los límites entre los cuales se encuentran los valores de conductividad térmica en hormigones de peso normal con agregados gruesos silíceos. En la Figura 8.a pueden verse dichos límites para diferentes temperaturas junto a los valores establecidos por la ASCE (ASCE, 2005) para hormigones con agregados gruesos calcáreos. Cabe destacar que los hormigones con agregados calcáreos poseen mejor desempeño frente al fuego que aquellos con agregados silíceos. Por su parte, el calor específico del hormigón a

 ISBN: 978-987-1323-89-0

temperatura ambiente puede variar en el rango de 840 a 1800J/kg·K dependiendo en gran medida del contenido de humedad y aumentando considerablemente cuanto mayor es la relación agua/cemento. Cuando el hormigón es sometido a temperaturas elevadas de alrededor de los 600 a 700ºC, su calor especifico presenta un valor pico que puede ser hasta cinco veces mayor de su valor a temperatura ambiente. Esto se atribuye a la deshidratación del hidróxido de calcio presente en el cemento endurecido. En la Figura 8.b pueden verse los valores de calor específico para hormigones de resistencia normal sometidos a altas temperaturas, adoptados tanto para el Eurocódigo como para la ASCE.



a. **b.**

Figura 8. Variación de **a.** la conductividad térmica y **b.** del calor especifico de hormigones sujetos a altas temperaturas (Khodur, 2014).

SPALLING EN EL HORMIGÓN

En los primeros tiempos el efecto spalling solo se atribuía al aumento de la presión de poro en la proximidad de la superficie hormigón calentada. En este caso, el aumento rápido de la temperatura favorece la formación de una barrera de humedad en la vecindad de la superficie calentada, como consecuencia de la evaporación del agua libre y de la baja permeabilidad del hormigón. Dicha barrera de humedad induce fuertes presiones de poro, dando lugar al descascaramiento de la superficie calentada, como puede verse en la Figura 9 (Ulm & Coussy, 1999).

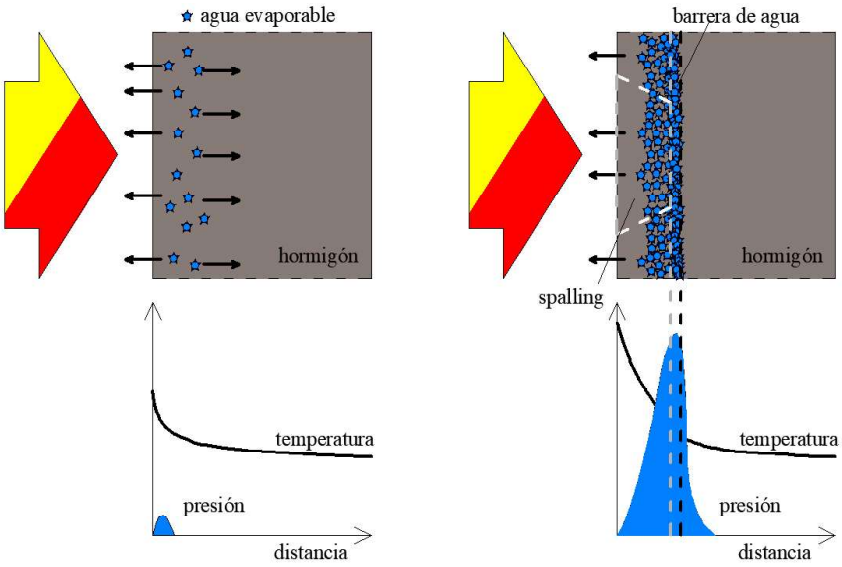


Figura 9. Variación de la presión de poro en la vecindad de la superficie de hormigón calentada.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

En la actualidad, se cree que el aumento de la presión de poro solo actúa como un disparador del fenómeno, porque una vez iniciada la fisura por sobrepresión, el desarrollo del spalling dependerá de las tensiones inducidas por gradientes térmicos dentro de la masa del material (Mindeguia et al., 2010; Hager, 2013).

RESISTENCIA MECÁNICA Y RIGIDEZ DEL ACERO

En la Figura 10.a se muestra la relación tensión-deformación simplificada que propone el Eurocódigo (CEN 2005c) para el acero en tracción. Pueden verse los límites de proporcionalidad (ε_p, f_p), de fluencia (ε_y, f_y), de deformación pico (ε_t), de deformación ultima (ε_u) y el módulo de elasticidad (E_α). En la Figura 10.b se muestra la misma relación constitutiva para distintos niveles de temperatura, donde puede verse que el valor de la tensión de fluencia disminuye conforme aumenta la temperatura a partir de los 500ºC, mientras que las deformaciones se mantienen fijas. Por otro lado, en la Figura 10.c se muestra la variación de la tensión de fluencia del acero con el aumento de la temperatura en base a ensayos experimentales extraídos de la literatura científica. A diferencia de la propuesta del Eurocódigo los resultados experimentales demuestran una marcada caída de dicha tensión de fluencia para temperaturas menores a 500ºC. En comparación con el hormigón sometido a tracción, esta caída es menos significativa, alcanzando valores aproximados del 30% para el acero a 400ºC, frente a valores aproximados del 60% para el hormigón a la misma temperatura. Finalmente, en la Figura 10.d se muestra la caída relativa para la tensión límite de proporcionalidad, para la tensión de fluencia y para la pendiente del rango elástico lineal, a diferentes niveles de temperatura. En cuanto a la expansión libre del acero frente a temperaturas elevadas, el valor se ve incrementado con el aumento de la temperatura y se acepta un crecimiento lineal (CEN 2005c).

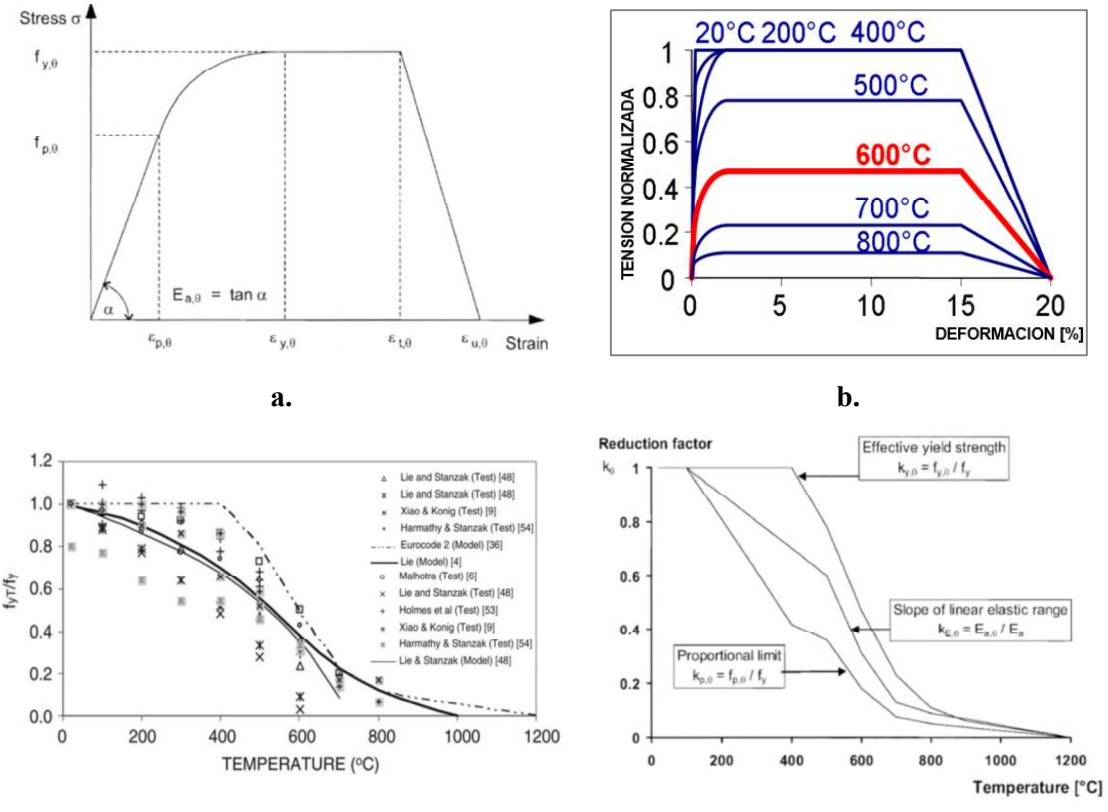
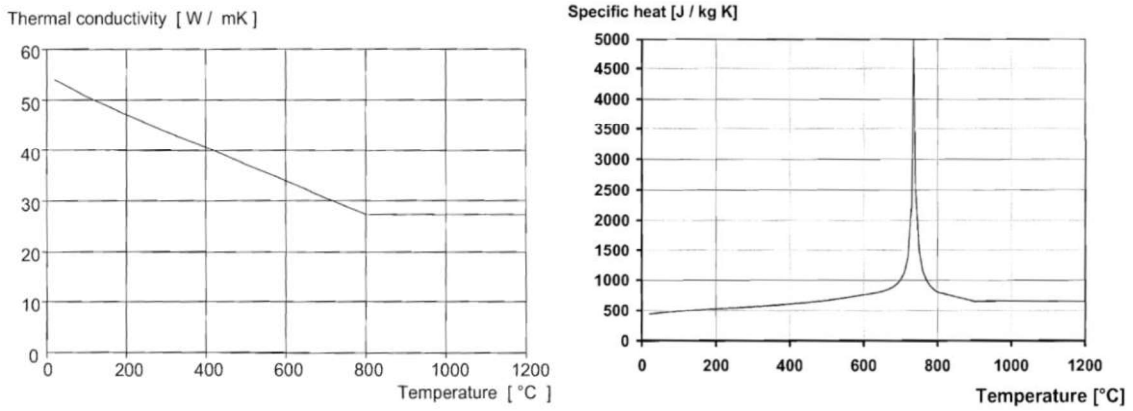


Figura 10. Relación constitutiva del acero **a.** a temperatura ambiente y **b.** altas temperaturas. Degradación de **c.** la tensión de fluencia y **d.** del límite de proporcionalidad, de fluencia y del módulo de Young a temperaturas elevadas (Youssef & Moftah, 2007, CEN 2005c).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y CALOR ESPECÍFICO DEL ACERO

La conductividad térmica del acero disminuye con el aumento de la temperatura, hasta aproximadamente el 50% de su valor a temperatura ambiente para temperaturas mayores a 800ºC, como puede verse en la Figura 11.a. Por otro lado, el calor especifico del acero no sufre grandes variaciones con el incremento de la temperatura, mostrando un pico repentino a una temperatura de alrededor de 750ºC, según puede observarse en la Figura 11.b. Dicho pico no es modelizado por el Eurocódigo, que suele adoptar un valor constante de alrededor de 600 J/[kg K] para todos los niveles de temperatura.



a. **b.**

Figura 11. Variación de **a.** la conductividad térmica y **b.** del calor especifico del acero sujeto a altas temperaturas (CEN 2005c).

ADHERENCIA ENTRE ACERO Y HORMIGÓN

La fuerza de unión entre el hormigón y el acero, en otras palabras la adherencia entre ambos materiales, disminuye cuando se eleva la temperatura. Esto puede verse en la Figura 12 a partir de los datos experimentales recopilados por Khodur, (2014). La adherencia depende fuertemente de la calidad del hormigón y del estado de la superficie de las barras de acero (Purkiss & Li, 2013). Así como ocurre a temperatura ambiente, las barras de superficies corrugadas también presentan un mejor comportamiento en altas temperaturas. Cabe destacar que en base a los resultados presentados en la Figura 12 y con el fin de adoptar un criterio conservador, podría suponerse que la adherencia entre acero y hormigón se degrada totalmente a 600ºC.

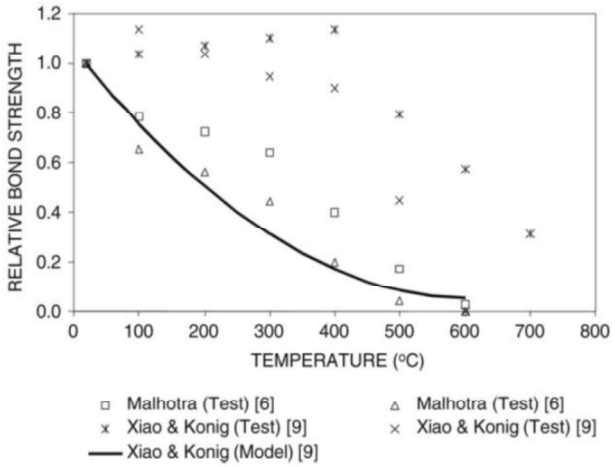


Figura 12. Datos experimentales de la adherencia del hormigón y del acero a diferentes temperaturas (Khodur, 2014).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron datos extraídos de la bibliografía científica y de las normativas acerca de las propiedades fisico-mecánicas del hormigón y del acero expuestos a altas temperaturas, para finalmente caracterizar el comportamiento como material compuesto.

Respecto al hormigón, quedó en evidencia cómo varían sus propiedades fisico-mecánicas con el aumento de la temperatura, encontrándose una marcada diferencia en su comportamiento dependiendo de la relación agua cemento, del contenido de humedad, del tipo de agregado grueso, ya sea silíceo, calcáreo o liviano, entre otros factores. Se ha observado que los hormigones con agregados calcáreos poseen un mejor comportamiento frente al fuego, mientras que los hormigones con agregados silíceos son los más susceptibles frente a este fenómeno. También quedó en evidencia que a mayor relación agua cemento, mayor es el calor especifico del hormigón, es decir, la cantidad de calor que es necesario suministrar para elevar su temperatura, lo cual podría considerarse una ventaja. Por otra parte, hormigones con mayores contenidos de humedad evidencian menor conductividad térmica.

En cuanto al acero pudo verse que, para temperaturas medianamente elevadas (hasta 400ºC), la caída de su resistencia a tracción en comparación con la del hormigón es menos marcada. Sin embargo, su alta conductividad térmica y su gran deformabilidad frente a las altas temperaturas, lo convierte en un material estructural mucho más susceptible frente a la acción del fuego en comparación con el hormigón.

Favorablemente, el conjunto hormigón armado presenta frente a altas temperaturas un excelente comportamiento fisico-mecánico en comparación a otros materiales, como la madera, los plásticos o los metales. Esto se debe principalmente a la capacidad que posee el hormigón de proporcionar una protección pasiva a las barras de acero, no solo frente a agentes agresivos sino también frente a un rápido aumento de temperatura, ya que el hormigón posee una conductividad térmica un 80% menor a la conductividad del acero, es decir, 0.8 a 1.5W/(m.K) para el hormigón, frente a 45 a 60W/(m.K) para el acero. Esto permite que las armaduras se mantengan a temperaturas por debajo de los valores críticos del acero durante un tiempo razonable de exposición al fuego. En base a lo expuesto, la mayoría de los reglamentos de diseño estructural de carácter prescriptivo se limitan principalmente a definir los espesores de recubrimiento mínimo de hormigón para proteger a las barras de acero.

Sin embargo, dependiendo del desempeño del hormigón frente al fuego, puede tener lugar el fenómeno de spalling. Como se explicó, este fenómeno se caracteriza por el descascaramiento explosivo de las superficies del hormigón, lo cual implica un grave peligro para la seguridad de los ocupantes al momento el incendio, no solo por los trozos de hormigón que pueden desprenderse bruscamente como proyectiles, sino también por la pérdida de la protección pasiva que el hormigón proporciona a las barras de acero, quedando estas últimas expuestas a mayores temperaturas en periodos de tiempo mucho más cortos y comprometiendo la estabilidad global de la estructura. En base a lo expuesto anteriormente, queda en evidencia la importancia de considerar en el diseño estructural no solo las propiedades individuales del hormigón y del acero frente al fuego, sino también las del material compuesto hormigón armado.

REFERENCIAS

ABNT NBR 15200 (2012). Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: procedimento. Brasil.

ACI 216.1-14 (2014), ACI Committee 216, Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies), American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

Albuquerque, G. (2012). Dimensionamento de vigas de concreto armado em situação de incêndio. Tesis de Maestría. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ASCE (2005), Standard calculation methods for structural fire protection (ASCE/SFPE Standard 29-05), American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

ASTM (2005), Standard methods of fire tests of building construction and materials (ASTM Standard E119-05), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

CEN (2004a) Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules – Structural fire design. EN 1992-1-2. European Committee for Standardization, Brussels.

CEN (2005c) Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. EN 1994-1-2. European Committee for Standardization, Brussels.

GRIIE - Grup de Recerca sobre Investigació D'incendis u Explosions, La investigació d'incendis i explosions. Mollet del Valles, Institut de Seguretat Pública de Catalunya, 2010, p.40- 41.

Hager, I., 2013. Behaviour of cement concrete at high temperature. Bull. Pol. Ac.: Tech. 61 (1), 1–10.

ISO 834-1, 1999. Fire resistance tests - elements of building construction. Part 1: general requirements International Organization for Standardization. Geneva.

Khodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. International Scholarly Research Notices, 2014.

Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. Progress in structural engineering and materials, 2(4), 429-447.

Macari Lagos, R. (2015). Criterios que determinan los requerimientos de resistencia al fuego de elementos estructurales. Tesis de grado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil

Mindeguia, J. C., Pimienta, P., Noumowé, A., Kanema, M., 2010. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — experimental and numerical discussion on spalling risk. Cement. Concrete Res. 40, 477–487.

NFPA (2006), Standard Methods of Tests of Fire Endurance of Building Construction and Materials. NFPA 251. National Fire Protection Association, Quincy, MA.

Purkiss, JA & Li, LY (2013). Diseño de estructuras de ingeniería de seguridad contra incendios. Prensa CRC.

PROMAT (2020). International fire curves – useful tool for designing fire safety. https://www.promat.com/en/construction/your-project/expert-area/33637/international-fire-curves-fire-safety/.

Ripani, M. (2016). Modelización computacional no local y análisis del hormigón en altas temperaturas. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires.

UL (2003), Fire Tests of Building Construction and Materials, UL 263. Underwriters Laboratories Inc, Northbrook, Illinois.

Ulm, F. J., Coussy, O., 1999. The chunnel fire I: Chemoplastic softening in rapidly heated concrete. J. Eng. Mech.-ASCE. 125 (3), 272–289.

Youssef, M. A., & Moftah, M. (2007). General stress–strain relationship for concrete at elevated temperatures. Engineering structures, 29(10), 2618-2634.

Zawadowska, A., Giuliani, L., & Hertz, K. D. (2021). Experimental study on the mechanical properties of fire exposed concrete. Safety science, 142, 105357.

AISLAMIENTO DE MICORRIZAS NATIVAS DE UN SUELO CERCANO A UNA FOSA PETROLÍFERA CON POTENCIAL USO PARA LA RECUPERACIÓN DE ÁREAS DEGRADADAS

Jesmary Rosas [a], Afrodita García Angarita [a], Angela De Sisto[a], Ysvic Inojosa[a], Laynet Puentes [a], Mingrelia España[b]

[a]*Dirección de Energía y Ambiente. Fundación Instituto de Estudios Avanzados (IDEA). Caracas. Venezuela.*
[b] *Dirección de Agricultura y Soberanía Alimentaria. Fundación Instituto de Estudios Avanzados (IDEA). Caracas. Venezuela*

e-mail: glomeromycota2022@gmail.com

RESUMEN

Los hongos de micorrizas arbusculares son unos organismos que se encuentran en simbiosis con las raíces de las plantas. Esta asociación se considera mutualística beneficiosa, ya que contribuye en la permanencia de las plantas en suelos contaminados. Actualmente, se han empleado en la recuperación de los suelos impactados con petróleo, metales pesados, plaguicidas entre otros, donde han sido detectados e identificados. Además, los hongos micorrícicos nativos promueven el proceso de degradación de los contaminantes en el suelo, mejorando sus propiedades físicas, químicas y biológicas contribuyendo en la rehabilitación, recuperación y restauración de los ecosistemas terrestre. En este contexto, el objetivo del trabajo fue detectar y aislar hongos micorrícicos arbusculares nativos, asociados a muestras de suelo cercanas a una fosa petrolífera venezolana. Para ello, se tomaron muestras de suelo rizosférico de una especie de gramínea dominante presente en las adyacencias de una fosa petrolífera ubicada en los llanos orientales venezolanos. Seguidamente las muestras de suelo se trasladaron al laboratorio donde fueron preservadas hasta su posterior análisis. Para lograr la reproducción de estos organismos, se realizaron cultivos trampa utilizando un hospedador con alta afinidad por estos hongos, los ensayos tuvieron una duración de 180 días, posteriormente se procedió a realizar el conteo de esporas en el suelo y a determinar el porcentaje de colonización (%LRM). Se observaron esporas viables relacionadas con la familia Glomeraceae, además una colonización en la raíz mayor al 50%. Estos resultados sugieren que los hongos nativos pueden tolerar condiciones de estrés edáfico, permaneciendo latentes en suelos que podrían estar contaminados. Por lo tanto, estos organismos pueden ser potencialmente empleados en la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Palabras claves: Fosa, Hongos Micorrícicos, Suelo, Hidrocarburos

INTRODUCCIÓN

Los llanos orientales Venezolanos ocupan una extensión de tres millones de hectáreas, lo que representa 3% del territorio nacional. La actividad económica principal de la región es la explotación petrolera, los suelos son arenosos, tienen poca capacidad de retención de humedad y son de muy baja fertilidad natural. La contaminación de estos suelos producto de la actividad petrolera constituye uno de los principales problemas ambientales que afectan la fauna y flora autóctona. No obstante, existe un creciente aumento en el desarrollo y la utilización de diferentes métodos y estrategias biotecnológicas con la finalidad de atenuar estos efectos (Garzón et al, 2017). Por lo

tanto, los procesos de biorremediación, son tecnologías que actúan a través de las interacción entre los microorganismos con la finalidad de minimizar los efectos nocivos causados por los contaminantes en los ecosistemas, es por ello que es viable y atractiva para restaurar suelos contaminados con hidrocarburos, sobre todo porque se puede disminuir la concentración del contaminante y mejorar la salud del suelo, estableciendo sus funciones e incrementando la calidad para hacer buen uso del recurso (Garbisu et al, 2007). Dentro de las diversas técnicas de biorremediación se encuentra la fitorremediación (plantas) y la micorremediación (hongos micorrízicos) (Benavides et al, 2006). La micorremediación, es una técnica que se basa en la biología de la asociación simbiótica mutualística entre las plantas con los hongos micorrizícos arbuscular (HMA), la cual constituyen se encuentra establecidas entre las raíces de la mayoría de las plantas superiores y un grupo de hongos del Phylum Glomeromycota (Alarcón, A. y Ferrera, R, 2000). Aproximadamente un 80% de las familias de plantas existentes tienen la potencialidad de formar este tipo de asociación (Tapia, J. 2010), entre ellas las gramíneas.Actualmente, este sistema biológico se ha empleado en la recuperación de los suelos impactados con petróleo, metales donde han sido detectados e identificados HMA. Además, promueven el proceso de degradación de los contaminantes en el suelo, mejorando sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En este contexto, el objetivo del trabajo fue detectar y aislar HMA nativos en muestras de suelos rizosféricos de las gramíneas provenientes de una zona adyacente a una fosa petrolífera venezolana y sugerir su potencial uso como una estrategia de recuperación de áreas contaminada con hidrocarburo.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Área de Estudio: Se encuentra ubicada en las cercanías de la población del Tigre, perteneciente al municipio Simón Rodríguez al sur del Estado Anzoátegui en Venezuela. Esta área forma parte de la Faja Petrolífera del Orinoco.

Obtención de las muestras de Suelo: En el área de estudio se colectaron tanto las muestras de suelo limpio como muestras de suelo rizosférico en un área contaminada con hidrocarburo cercana a una fosa petrolífera. Una vez obtenidas estas muestras fueron trasladas al laboratorio y preservadas a 4°C para su posterior análisis.

Determinación de indicadores microbiológicos asociados a los HMA nativas en las muestras de suelo rizosférico colectados en el área de estudio.

Contaje de esporas de HMA en suelos rizosféricos. De cada muestra de suelo se tomó una sub muestra de 100g para el conteo de esporas. Estas se separaron por el método de decantación húmeda propuesto por Sieverding (1991).

A. **Clasificación taxonómica de los HMA.** Las esporas obtenidas en la fase anterior se observaron al microscopio y se clasificaron siguiendo la metodología descrita por Mortony Betivenga (1994). Adicionalmente se compararon estos caracteres de cada grupo considerando: diámetro, color, tamaño, posición de la hifa, presencia de ornamentación en la pared, con las descripciones del International Vesicular Arbuscular Culture Collection (www.invam.caf.wvu.edu/), lo cual permitió describir a las taxas presente en cada muestra.

Bioensayo para determinar el potencial micorrízico (infectividad) de los suelos. Con las muestras de suelos obtenidas en el área de estudio se procedió a determinar el potencial de infectividad de las micorrizas empleando la metodología descrita por Plenchette et al. (1989). Para ello se utilizaron un total de 50 semillas correspondiente a una gramínea de la familia Poaceae, las cuales se sembraron en conos plásticos de 80

cm3 que contenían las muestras de suelo contaminado con hidrocarburo de la fosa y suelo limpio. Se sembraron 25 semillas por cada tipo de suelo. Este ensayo tuvo una duración de 180 días.

Porcentaje de colonización micorricicas en raíces (%LRM). Una vez culminado el ensayo, se procedió a extraer las raíces del suelo, posteriormente estas fueron blanqueadas con una solución de KOH al 10% y teñidas con azul de tripano según la metodología descrita por Phillips y Haymman (1970). El conteo por observación fue realizado con un microscopio óptico a 40 X, empleando el método de intercepción en cuadrícula (Newman, 1966), tomando en cuenta la presencia o ausencia de estructuras características de las HMA; arbúsculos, vesículas, enrollados hifales e hifas (McGonigle et al. 1990).

Análisis estadístico: A partir de las frecuencias y abundancias de los morfotipos identificaos en cada zona, se calculó el índice de diversidad de Simpson, índice de dominancia e índice de similitud de Jaccard con la finalidad de observar las diferencias o similitudes en la composición comunitaria de HMA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. **1A**, se observó un porcentaje de micorrización en las raíces del 90,9% en suelo limpio nativo y en el suelo contaminado de la fosa 80,3%. Este resultado sugiere que ambos inóculos son infectivos, ya que muestran afinidad por la gramínea que se empleó en el ensayo, sin embargo, la mayor infectividad se muestra en el suelo limpio nativo con respecto al de la fosa. Esta diferencia puede atribuirse probablemente a la presencia de sustancias derivadas del contaminante del suelo de la fosa, el cual puede estar interfiriendo en la colonización, obstaculizando la formación del apresorio que es la estructura de penetración de la hifa al interior de la raíz (**Fig. 1B**). Sin embargo, el porcentaje obtenido en las raíces de las plantas del ensayo del suelo contaminado está por encima del 50%, similar a los reportados en las raíces de algunas especies de gramíneas que se encuentran en zonas impactadas en la sabana del oriente de Venezuela, sobre todo en los alrededores de fosas de contención de crudo (Rosas et al, 2022). Este porcentaje de micorrización estaría indicando que la simbiosis es necesaria para la sobrevivencia de la planta, además que permite tolerar las concentraciones del contaminante, lo cual demuestra que estos microorganismos favorecen la permanencia de las diversas especies de plantas en lugares impactados, así lo mencionan Aguilar (2020) con los resultados obtenidos en estudio realizado sobre la presencia de HMA en sabanas impactadas con hidrocarburo.

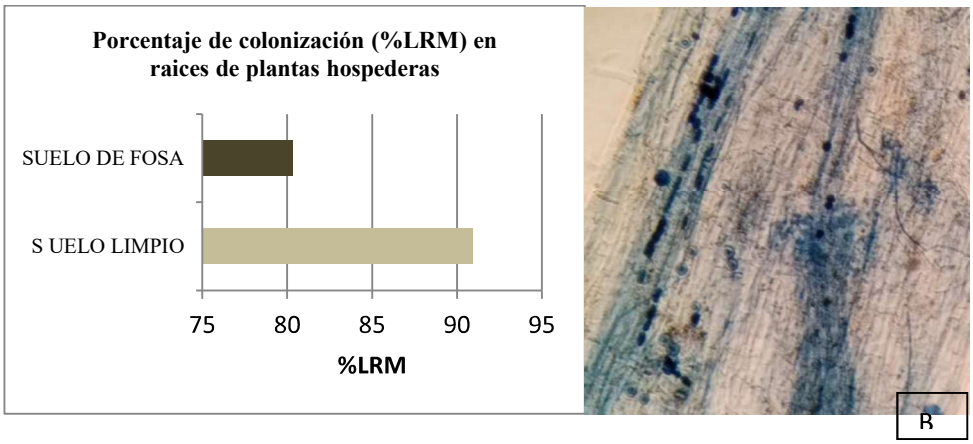


Fig. 1. Porcentaje de Colonización en las raíces de la planta hospedera (Familia: Poaceae) y raíz micorrizada de los los ensayos (**A y B**)

 ISBN: 978-987-1323-89-0

La Fig. 2, corresponde a el número de esporas viables en las muestras de suelos rizosférico de las cercanías de la fosa y el suelo limpio. En ella se muestra que existe una menor cantidad de esporas en suelo limpio con respecto al observado en suelos provenientes de la cercanía de la fosa. Esta diferencia puede estar asociada a las condiciones de suelo, como lo son la disponibilidad del agua, temperatura y pH además de la sensibilidad de algunos grupos de HMA con respecto a los contaminantes, lo cual podría estar condicionando la tolerancia de este grupo de microorganismos a estos ambientes

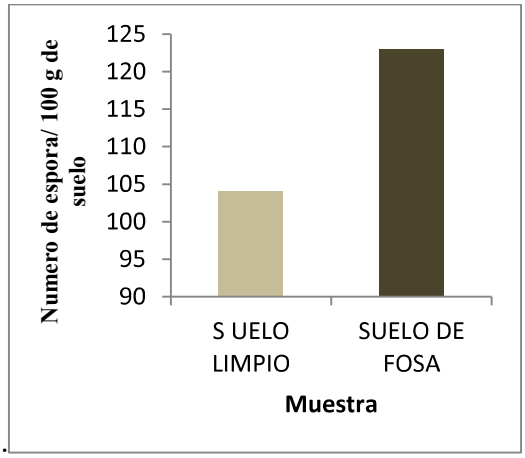


Fig.2. Número de esporas presentes en suelos rizosférico y limpio

Una vez aisladas las esporas de HMA presentes tanto en el suelo limpio nativo como en los provenientes de la fosa con hidrocarburos, se procedió a la identificación de las esporas tomando en cuenta los caracteres morfológicos anteriormente mencionados. Los morfotipos identificados en en su mayoría comparten características descritas para las familias Glomeraceae y Gigasporacea, además se detectó un morfotipo (Morfo 6, ver Fig. **3.A),** en el suelo limpio nativo cuyas características morfológicas están compartidas entre dos familias la Glomeraceae, aun esta por identificar.

Con los resultados de la identificación, se obtuvo la composición micorrícica presente en las muestras de suelo rizosférico limpio y el otro proveniente de la cercanía de la fosa, los cuales se muestran en la siguiente figura:

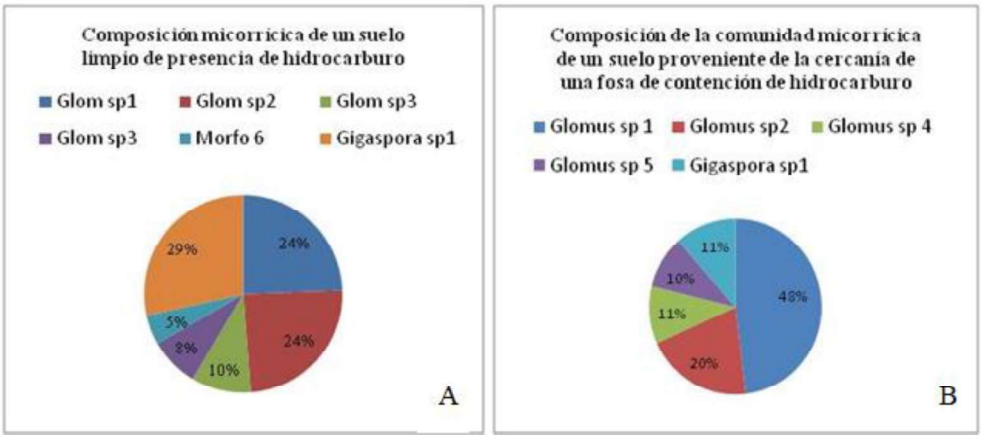


Fig 3. Composición de la comunidad micorrícicas presente en los ensayos con suelo limpio nativo y los provenientes de la cercanía de una fosa de hidrocarburo (A y B)

En ella se puede observar la distribución porcentual de los morfotipos en la composición micorrícica de las muestras de suelos rizosférico limpio y con crudo. El mayor porcentaje para ambas zonas corresponde a la familia de las Glomeraceae y el menor a la Gigasporaceae. Estos resultados son similares a los reportados en ecosistemas de sabanas impactadas con la presencia de hidrocarburos Aguilar (2020) y con prácticas agrícolas intensas Cervantes–Gámez et al. (2021). Además, Rosas et al. (2022) y Toro (2007) mencionan la presencia de la familia Glomeraceae asociada a las raíces de las especies de gramíneas en las sabanas orientales venezolanas con presencia de crudo. Este resultado indica que esta familia muestra tolerancia a condiciones edáficas estresantes como lo son las concentraciones de crudos y otros contaminantes.

Para complementar el estudio, se determinaron los índices ecológicos como lo son los relacionados con la riqueza, dominancia y similitud entre las composiciones micorrícicas de los suelos rizosféricos, a continuación, en la tabla I se muestra los resultados

Tabla I. Índices ecológicos de Dominancia (D) y Riqueza (Simpson 1-D) determinados en la comunidad micorrícica presente en los suelos limpios y los cercanos a la Fosa

Índices Ecológico	**Fosa**	**Limpio**
Dominance_D	**0,3057**	0,1989
Simpson_1-D	0,6943	**0,7439**

En ella se puede observar una mayor dominancia en los suelos provenientes de la fosa con respecto al suelo limpio. Este resultado se relaciona con lo obtenido en la composición micorrícica (**Fig.3B**), ya que la mayor presencia de morfotipos están asociados a la familia más cosmopolita de los Glomeromycota como lo son las Glomeraceae, sin embargo el índice de Simpson nos indica que existe menos riqueza, esto se refiere con la variedad de morfotipos identificados en las muestras, el cual corrobora que existe una mayor homogeneidad en la composición de los HMA debido a la presencia de individuos asociados a los géneros de la familia Glomeracea. Con respecto al suelo limpio existe una mayor riqueza, ya que se observó un morfotipo que difiere en algunos caracteres de las familias anteriormente mencionadas, lo que ligeramente incrementa el valor de este parámetro con respecto al de la fosa. Sin embargo, las Glomeraceae sigue dominando en la composición de los HMA.Y por último el índice de similitud nos indicó que a pesar de la presencia de un morfotipo distinto en las muestras de suelo limpio, hay semejanzas entre ambas composiciones ya que el valor obtenido es de 0,857. Finalmente, estos valores, son similares a los reportados por Providencia *et al.* (2015), en el cual menciona en su trabajo con pastizales impactados con crudo, la dominancia del género *Glomus* perteneciente a la familia de las Glomeraceae, además menciona que este género es cosmopolita y se adapta fácilmente en ambiente perturbados.

CONCLUSIÓN

Se identificaron cinco morfotipos de HMA en las muestras de suelo rizosférico proveniente de una fosa petrolífera y suelo limpio. Estos comparten caracteres

morfológicos con la familia Glomeracea y Gigasporaceae, siendo la primera con mayor dominancia en ambientes contaminados por hidrocarburo.

El aislamiento de estos morfotipos y su inoculación en las plantas hospedera en el ensayo, permitió demostrar su alta infectividad bajo condiciones de estrés edáfico (presencia de un contaminante) indicando que pueden ser empleados potencialmente como estrategia de recuperación de suelo, ya que muestran tolerancia, resistencia y favorecen la permanencia de las plantas en ambientes perturbado

REFERENCIAS

Alarcón, A. y Ferrera, R. Ecologia, fisiologia y biotecnologia micorriza arbuscular., Mundi-prensa. Universidad Autonoma de Chapingo. Mexico: Capingo. (2000)

Aguilar V, E. Hongos micorricicos arbusculares asociados a campos petroleros. Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, Veracruz. México. (2020).

Brundrett, M, Piché, Y, and Peterson, R.L. A new methodforobservingthemorphology of vesicular–arbuscularmycorrhizae. Can. J. Bot. 62(10): 2128 –2134. doi:10.1139/b84-290. (1984).

Cervante – Gamez, R.G, Peñuela – Rubio, O, Araujo- Bernard, N, Ferro- Coronado, R.A, Trejo-Aguilar, D, Maldonado- Mendoza, I.E, Cordero- Ramírez, J.D. Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz en suelos de transición: ecosistema natural - uso agrícola. ScientaFugorum. Vol. 51: e1330. (2021). DOI: 10.33885/sf.2021.51.1330

Garbisu, C., Becerril, J. M., Epelde, L., y Alkorta, I. Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador, Ecosistemas. 16(2), 44–49. (2007).

Garzón, J.M., Rodríguez-Miranda, J.P y Hernández-Gómez, C. Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. Rev Univ. Salud. 19(2):309-318. (2017).

McGonigle, T.P, Miller, M.H, Evans, D.G, Fairchild, G.L, and Swan, J.A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular–arbuscularmycorrhizal fungi.New Phytol. 115(3): 495–501. doi:10.1111/j.1469-8137.1990. tb00476.x. (1990).

Morton, J.B and Betivenga, S.P. Levels of diversity in endomycorrhizal fungi (Glomales, Zygomycetes): a new order, Glomales, two suborder, Glomineae and Gigasporineae, and two new families, Acaulosporaceae and Gigasporaceae, with an emendation Glomaceae. Mycotaxon, 37: 471-491 (1994)

Phillips, J. M. and D. S. Haymann.Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscularmycororrhizal fungi for rapid assessment to infection. Trans. Brit. Mycol. Soc. 55: 158-161. (1970).

Plenchette C, Perrin R, Duvert, P. The concept of soil infectivity and a method for its determination as applied to endomycorrhizas. Can. J. Bot. 67: 112-115. (1989).

Providencia, I. E.-A. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungal diversity associated with Eleocharis obtusa and *Panicum capillare* growing in an extreme petroleum hydrocarbon-polluted sedimentation basin. FEMS. Microbiologyletters, 362 (12). doi:10.1093/femsle/fnv081

Rosas, J, López – Hernández, I.D., Toro, M. Potential for the Remediation of impacted with polluted. Mycorrhizal Fungi in South America: Biodiversity,Conservation and Sustainable food production. M. A. Lugo and M.C. Pagano (Eds.) Springer, New York. (2022).

Sanchéz de Prager, M., Posada A, R., Velasquez P, D., Narvaez C, M. Metdología básica para el trabajo con micorrizas arbusculares y hongos formadores de micorrizas arbusculares. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. (2010). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/271507112

Sieverding, E. Vesicular- Arbuscular Mycorhizas management in tropical agroecosystems. Germany: GTZ. Rossdorf. (1991).

Tapia, J. Infectividad y efectividad de hongos micorrízicos arbusculares nativos de suelos salinos en el cultivo de lechuga (Lactuca sativa). Rev. Mex. Mic. (2010).

Toro, M. Micorrizas arbusculares en ecosistemas de sabana venezolanos. Arbuscular mycorrhizae in Venezuelan savanna ecosystems. En Montaño NM, Camargo-Ricalde SL, García-Sánchez R, A. Monroy-Ata. Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos (Arbuscular mycorrhizae in arid and semiarid ecosystems) (pgs 243-267). (2007).

USO INTEGRADO DE DATOS SATELITALES PARA EL MONITOREO DE PARÁMETROS HIDROMETEOROLÓGICOS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO COLORADO, ARGENTINA

Ana Paula Salcedo[a], Carolina Aumassanne[b], Romina Solorza[c], Sofia Teverovsky[c], *Susana Haye* [a] *y* Patricio Oricchio[d]

[a]*Subgerencia Centro Regional Andino, Instituto Nacional del Agua, Mendoza, ARGENTINA*
[b] *Agencia de Extensión Rural de INTA 25 de Mayo, La Pampa, ARGENTINA*
[c]*Gerencia de Observación de la Tierra. Comisión Nacional de Actividades Espaciales, Córdoba, ARGENTINA*
[d]*Instituto de Clima y Agua de INTA Castelar, Buenos Aires, ARGENTINA.*

e-mail: apsalcedo@ina.gob.ar

RESUMEN

La cuenca del río Colorado tiene un régimen hidrológico que depende casi exclusivamente del agua de deshielo. Por lo tanto, existe una estrecha relación entre la nieve caída en el invierno en la alta cuenca y los caudales durante la primavera-verano. Por tratarse de cuencas de grandes extensiones, los datos de las estaciones meteorológicas y nivológicas no son suficientes para cuantificar la acumulación nival y la posterior fusión, debido a su baja representatividad espacial. Esa limitación puede superarse con el uso integrado de datos satelitales ópticos y de Radar de Apertura Sintética (SAR), y datos de estaciones de medición en campo. En el marco de un convenio interinstitucional INA-INTA-CONAE, se está trabajando en el desarrollo de un sistema integrado de datos para asistir al monitoreo de la cuenca, estableciendo como objetivos a mediano plazo: caracterizar la disponibilidad total de nieve; conocer la dinámica del deshielo, identificando el comienzo y tiempo de retardo en función los parámetros morfométricos de la cuenca; y utilizar estos parámetros como entrada en un modelo de simulación hidrológica. En ese contexto, se presentan aquí los primeros resultados del análisis de la nieve húmeda estimada con datos Sentinel-1, en un sector del río Grande, cuenca del Colorado. Los resultados se validaron con mediciones de equivalente de agua en nieve y caudales, analizando la proporción de nieve próxima a la fusión con datos SAR, respecto al área total de nieve estimada con datos ópticos. Se identificó el inicio de la fusión a mediados de agosto, con valores en torno al 5 % de superficie de nieve en fusión y su finalización hacia principio-mediados de noviembre, con valores máximos de hasta 40 %, disminuyendo en diciembre la cobertura nival. En la actualidad, se están integrando a este trabajo nuevas fuentes de información como los datos SAR del satélite SAOCOM.

Palabras Clave: Nieve de fusión, Cuenca Colorado, Sentinel 1.

INTRODUCCIÓN

La cubierta de nieve en las cuencas andinas constituye una importante reserva de agua dulce, para el abastecimiento humano, productivo, generación de energía, turismo, recreación y requerimientos ecológicos. El régimen hídrico de las cuencas del centro oeste de Argentina es esencialmente pluvio-nival y, en consecuencia, es fuertemente dependiente de la cantidad de nieve que precipita durante el invierno y se acumula en las altas cuencas (Boninsegna & Llop, 2015). Existe una alta relación entre la cantidad de nieve caída durante la estación invernal y los caudales del período estival (Masiokas

et al., 2006). De esta manera, del agua proveniente de la fusión de la nieve dependen gran cantidad de actividades sociales y productivas. Por lo cual, en estas cuencas el conocimiento de la cantidad de nieve acumulada, es clave para la gestión y aprovechamiento sostenible del agua.

Para cuantificar la acumulación y fusión de nieve, el uso de datos provistos por estaciones meteorológicas, cateos o colchones de nieve no suelen ser suficientes en cuencas de grandes extensiones debido, principalmente, a la baja representatividad espacial de estas mediciones (Lascano & Velasco, 2007). En general, no permiten caracterizar la enorme variabilidad de ambientes y condiciones existentes en áreas de montaña (Cara et al., 2016). Por tal motivo, los sensores remotos montados sobre plataformas satelitales resultan una herramienta útil para la estimación del área cubierta por nieve debido a las características espectrales propias de la nieve (Aumassanne, 2019). Mientras que el mapeo de nieve desde sensores ópticos aprovecha el alto albedo que tiene la cobertura nival, su estimación con Radares de Apertura Sintética (SAR) se basa, principalmente, en la atenuación que muestra la señal de respuesta debido a la presencia de agua líquida en el paquete de nieve. Existen diversos estudios (Shi & Dozier, 1995 y 2000; Nadir Arslan et al., 1998; Martini et. al 2006; Pettinato et al., 2004 y 2011; Rott, et. al 2009) que explican variadas metodologías y algoritmos para la estimación de área cubierta de nieve con datos SAR. La mayoría de ellos se basan en los desarrollos de Nagler & Rott 2000, el cual se fundamenta en la diferencia entre la señal retrodispersada del suelo cubierto por nieve húmeda y suelo sin nieve o con nieve seca. Asimismo, y profundizando en esta línea de investigación, Marin et al. 2020 y Pasian et al. 2020, han podido diferenciar fases en el deshielo al comparar la respuesta de la señal radar (en este caso Sentinel-1, banda C) con mediciones y simulaciones de Equivalente de Agua en Nieve (EAN) y Contenido de Agua Líquida (CAL) en los Alpes italianos.

En Argentina, con datos ALOS PALSAR en banda L, Solorza et al. 2016, realizaron estimación de nieve en una cuenca cordillerana al norte de la Patagonia Argentina. Asimismo, con datos ERS-2 en banda C, Salcedo A.P 2011, estimó cobertura de nieve húmeda y seca en la cuenca del río Neuquén en la cordillera Argentina. Unos kilómetros al norte de Neuquén en la provincia de Mendoza, Teverovsky et al. 2018 estimaron cobertura de nieve húmeda en la cuenca del río Tupungato con datos Sentinel- 1.

ÁREA DE ESTUDIO

Para este trabajo, se definió como área de estudio una subcuenca en la porción más meridional de la cuenca alta del río Colorado, precisamente, en la zona norte de la subcuenca del río Grande, siendo este el principal afluente del río Colorado. La subcuenca seleccionada tiene 624 km^2, cuyo cierre se encuentra en proximidades de la estación nivológica Valle Hermoso (Fig. 1). El río Colorado posee vertiente Atlántica y sus nacientes se ubican en la cordillera de los Andes entre las latitudes 35º y 37º Sur. Posee dos tributarios principales, el río Grande y el río Barrancas. La subcuenca del río Grande se ubica al sur de la provincia de Mendoza, parte oriental de la cuenca alta del río Colorado, con una extensión de 10.405 km^2 , de régimen nival (Lauro et al., 2016), y un caudal medio anual de 111 m3 .s-1. Sobre la porción suroeste de la cuenca del río Colorado se ubica la subcuenca del río Barrancas, entre la provincia de Mendoza y Neuquén, con un área de drenaje de 3.544 km^2 y un caudal medio anual de 36,6 m3 .s-1 (Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública y Comité Interjurisdiccional del río Colorado, 2013).



Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

En vista de la situación hidrometeorológica de los últimos 11 años, donde la cuenca atraviesa el período seco más extenso, sumado a las mayores demandas de agua, principalmente desde el sector productivo, es elemental conocer la dinámica espacio temporal de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado, y la consecuente escorrentía originada por la fusión de la nieve.

La acentuada sequía que afronta la región sumado a los escenarios futuros de cambio climático que indican déficit de precipitación para los próximos años, y disminución de los caudales (situación que se observa en la Fig. 2), hacen necesario adquirir formas para adaptarnos a estos nuevos contextos. Por tanto, unir esfuerzos entre instituciones para desarrollar métodos y técnicas innovadoras que colaboren en el conocimiento de los procesos en alta montaña, es clave para conocer la oferta hídrica y planificar la demanda.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

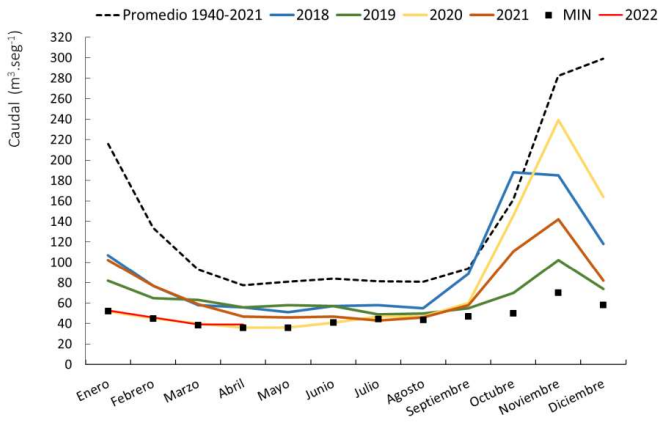


Figura 2. Caudal medio mensual del río Colorado en la estación But Ranquil (Neuquén).

En el presente trabajo se mostrarán los primeros resultados obtenidos en el marco de convenios interinstitucionales de cooperación técnica que se encuentran actualmente en ejecución. En este caso, se mostrarán resultados en cuanto al uso de datos satelitales SAR en el conocimiento de las condiciones de la nieve en su fase de deshielo.

MÉTODOS

Para el conocimiento de la cobertura nevada en su fase de deshielo, se utilizan dos aproximaciones metodológicas.

La primera permite generar mapas de cobertura de nieve en proceso de fusión, y se basa en una técnica de detección de cambio con imágenes SAR a partir de un cociente de bandas (Nagler 1996 y Nagler y Rott 2000, 2004). El procedimiento se sustenta en el cambio estacional significativo que presenta el coeficiente de retrodispersión σ_o (o eco de retorno de la señal a la antena SAR), entre las estaciones de invierno y verano (con nieve seca y sin nieve respectivamente), respecto a la estación de fusión o de primavera (Fig. 3). Por lo tanto, mediante un cociente de imágenes SAR de distintos períodos, es posible estimar la superficie cubierta de nieve húmeda o próxima a fusión, es decir aquella que posee un CAL > 0 (Solorza. *et. al*. 2016). Cabe aclarar, que para la señal SAR, en condiciones de nieve seca (nieve fresca recién caída o nieve de invierno con 0 < CAL) así como sin nieve (verano) es similar, en el sentido que la señal de retorno mostrará la retrodispersión superficial de la interfase nieve/suelo, haciendo que para el invierno la nieve tenga un comportamiento "transparente" a la señal. Por tal motivo, bajo esta técnica no es posible cartografiar la nieve seca.

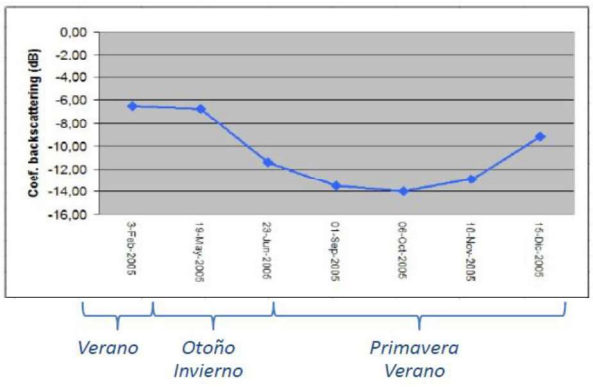


Figura 3. Variación del σ_o a lo largo de las estaciones. Salcedo, A.P 2011.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

La segunda metodología utilizada permite identificar fases en el proceso de deshielo dentro del paquete de nieve, en particular las fases de humedecimiento y maduración, así como el inicio de la fusión y posterior escorrentía. En este caso se siguen los desarrollos de Marin et al. 2020 y Pasian et al. 2020, que analizan la variación del coeficiente de retrodispersión de imágenes SAR Sentinel-1, respecto a la variación del EAN y de CAL medido en campo, así como simulado a partir de modelos de base física.

De acuerdo a Pasian et al. 2020, la fase de humedecimiento aparece al inicio de la temporada de primavera, cuando la capa superficial del paquete de nieve se fusiona durante el día y se recongela durante la noche o luego de un evento de precipitación. La fase siguiente es la de maduración, que se caracteriza por una percolación de la humedad superficial hacia las capas subyacentes, lo que pronto convierte al pack de nieve en isotérmico. Al final del proceso, el pack de nieve no puede retener más agua circundante y da inicio a la fusión total y posterior escorrentía.

La Fig. 4 muestra el incremento significativo de CAL, que indica el comienzo de la fase de humedecimiento, mientras que la caída del EAN indica el inicio del escurrimiento. Estas variaciones se pueden relacionar con los cambios de σ_o exhibidos por la señal SAR, entre los cuales se evidencia que el mínimo valor de σ_o coincide con la caída del EAN y CAL, por tanto el inicio de la escorrentía por fusión.

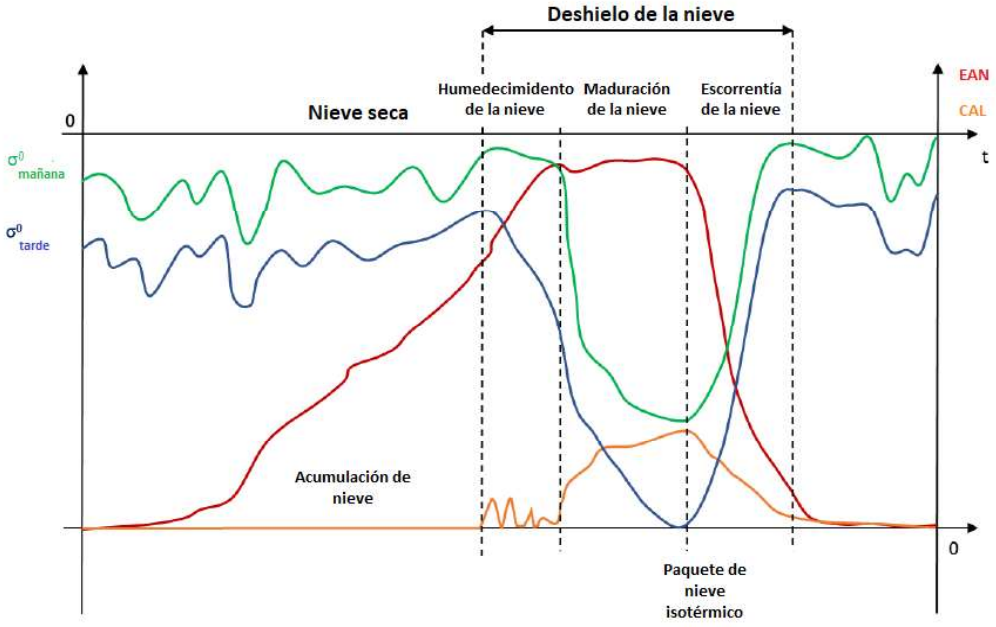


Figura 4. Representación esquemática de la evolución del coeficiente de retrodispersión (σ_o) comparado con CAL y EAN. Las tres fases están identificadas como humedecimiento, maduración y escorrentía. Pasian et al. 2020

En la aplicación de estas dos metodologías se utilizó una serie de imágenes SAR de Sentinel-1 descargadas del sitio web de Copernicus, de los periodos de fusión de los años 2015, 2016 y 2019. Se descargaron en nivel de procesamiento 1 GRD (Ground Range Detected) en modo IW (Interferometric Wide Swath) (Tabla I). El preprocesamiento de las imágenes se realizó en el software de la Agencia Espacial

Europea SNAP (Sentinel Application Platform), que consistió en la corrección orbital, eliminación del ruido térmico y de bordes, calibración y corrección topográfica.

Para las comparaciones con mediciones de terreno, se utilizaron los registros de EAN de la estación de alta montaña Valle Hermoso, que pertenece al Sistema de Información Hidronivometeorológico, Departamento General de Irrigación, Mendoza, y de la estación de aforo La Estrechura del Sistema Nacional de Información Hídrica, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de Nación.

Tabla I. Imágenes SAR Sentinel-1 utilizadas

Sentinel 1	Polarización	Modo	Track
19-sep-15	VV	IW - GRD	83
13-oct-15			
6-nov-15			
20-ago-16			
13-sep-16			
7-oct-16			
18-dic-16			
10-ago-19			
3-sep-19			
27-sep-19			
9-oct-19			
21-oct-19			
2-nov-19			
14-nov-19			
8-dic-19			
20-dic-19			

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la aplicación del método de cociente de imágenes se obtuvieron los mapas de nieve en proceso de fusión para todas las fechas descargadas. En la Fig. 5 se observan los mapas para los meses de primavera de los años 2015 y 2016. Para el año 2015, en el inicio de la fusión se calcula un 20 % de nieve húmeda y ya entrada la primavera, en noviembre, con un 40 % de nieve húmeda. Para el año 2016 se identifica una variación similar, con el pico de superficie de nieve en fusión en octubre/noviembre.

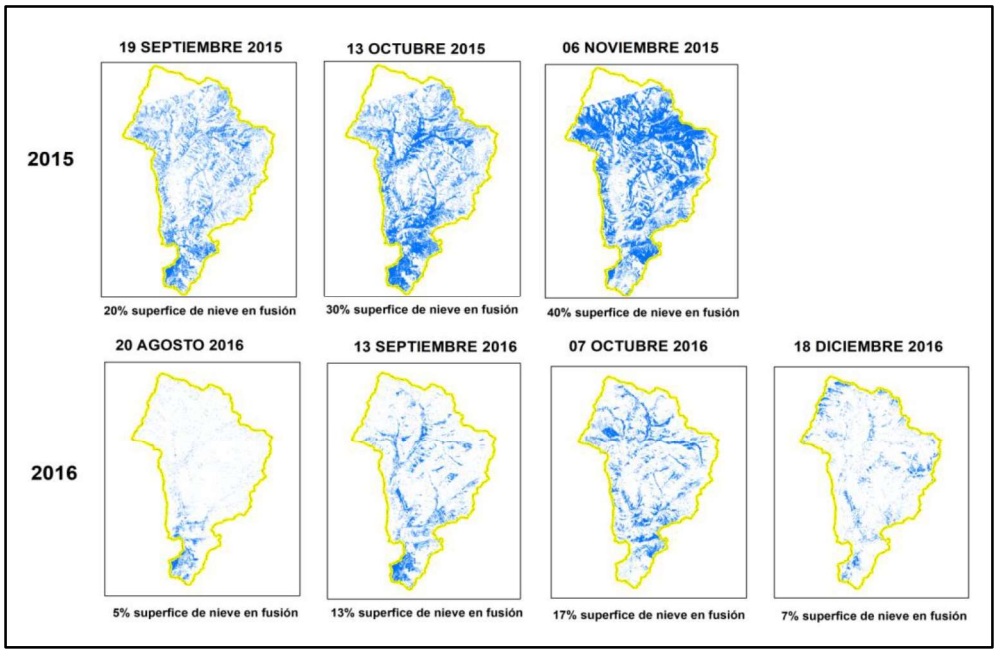


Figura 5. Mapas de área cubierta de nieve húmeda para los años 2015 y 2016.

El aumento del área cubierta de nieve húmeda (ACN H) coincide temporalmente con el inicio de la caída del valor de EAN (Fig. 6). El año 2015 registró mayores nevadas respecto al 2016, observándose esto en una menor superficie de ACN H en 2016 así como también menor registro de EAN (150 mm menos en 2016 respecto a 2015).

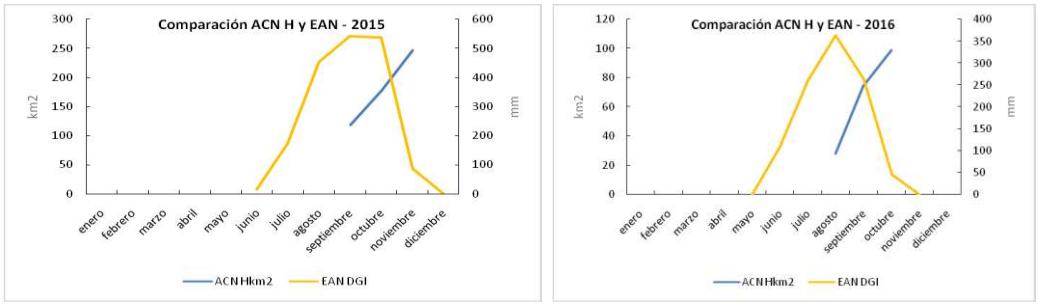


Figura 6. Comparación del área cubierta de nieve húmeda y EAN para los años 2015 y 2016.

En relación a la identificación de las fases dentro del proceso de deshielo, se pudo diferenciar en la zona de trabajo, entre la fase de humedecimiento/maduración respecto a la fase de escorrentía. Para ello, se utilizó toda la serie de imágenes SAR del año 2019 y su comparación con las mediciones de EAN. No fue posible diferenciar entre las fases de humedecimiento y maduración por no contar con mediciones de CAL.

El mínimo valor de σ_o (polarización VV) coincide con el máximo valor de EAN (hacia fines de Agosto) y posterior disminución abrupta del mismo indicando el inicio del proceso de fusión/escorrentía (Fig. 7). También en la misma gráfica se observan los valores de caudales de la estación de aforo La Estrechura, en la que se identifica el aumento del caudal luego de la disminución del EAN. Tomando este concepto y asumiendo que todos los píxeles con valores mínimos de σ_o indican el máximo de EAN

 ISBN: 978-987-1323-89-0

y por tanto el inicio del deshielo, se generó un mapa (Fig. 8) con los valores mínimos de σ_o por cada pixel por cada fecha de Sentinel-1 del año 2019.

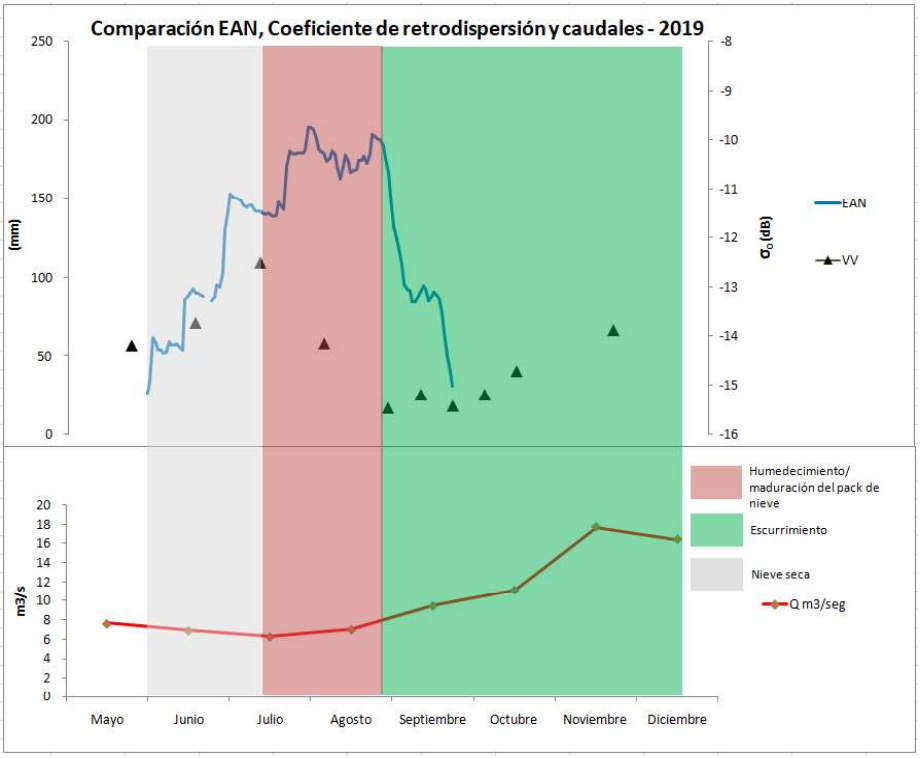


Figura 7. Identificación de fases del deshielo a partir de la comparación de σ_o y valores de EAN y caudal. En la franja gris se observa el periodo de inicio de nevada (nieve seca), en rosa las fases de humedecimiento/maduración y en verde el inicio del deshielo y posterior escorrentía. Mediciones de EAN estación Valle Hermoso. Mediciones de caudal estación de aforo La Estrechura.

En las zonas bajas del área de estudio, principalmente los valles, los píxeles de valores mínimos (que están en fase de fusión/escorrentía) corresponden a las fechas de agosto e inicio de septiembre, principalmente. En cotas intermedias se ubican las fechas de fines de septiembre y octubre, y en las zonas más altas los píxeles de final de temporada de deshielo de noviembre. Del histograma de frecuencias de cantidad de píxeles por fecha según elevación, se interpreta que en agosto la altura promedio de los pixeles en fusión, es en torno a los 3000 metros, en septiembre 3100 metros, en octubre 3200 metros y en noviembre en 3500 metros, que puede coincidir en algunos casos con zonas englazadas.

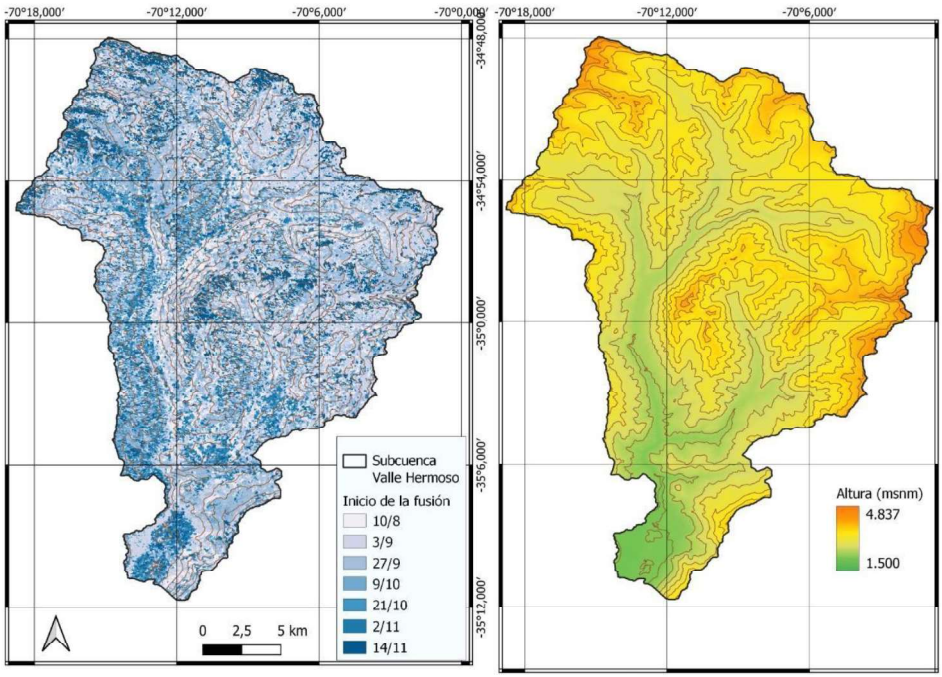


Figura 8. Mapa de valores mínimos de σ_o indicando inicio de la fusión según fechas de imágenes SAR y modelos digital de elevaciones.

CONCLUSIONES

En este trabajo se aplican metodologías tendientes a generar información distribuida en el espacio de las condiciones de la nieve, que otorguen apoyo a los datos puntuales de estaciones de medición en alta montaña y ayuden a la toma de decisiones y a la gestión del recurso en un contexto crítico de escasez hídrica.

Se explota el uso de datos satelitales de radar SAR y su correlación con datos medidos de estaciones en alta montaña permitiendo un seguimiento espacio-temporal de las condiciones del manto nival con distintas fuentes de información.

Las dos metodologías utilizadas permiten conocer los rasgos y comportamiento de la cuenca en su periodo de fusión nival, otorgando datos tales como el inicio de la misma, la superficie de nieve próxima a fusión y las cotas de ubicación.

Por último, se destaca la importancia de realizar convenios interinstitucionales de cooperación técnica para fortalecer vínculos, y aportar capacidades a demandas territoriales concretas.

REFERENCIAS

Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Di Bella, C. M., Oricchio, P. y Gaspari, F. J. Cobertura de nieve en las cuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA). Recibido 19 de junio de 2018, aceptado 21 de enero de 2019, publicado online 4 de diciembre de 2019.* http://ria.inta.gob.ar/trabajos/cobertura-de-nieve-en-las-subcuencas-de-los-rios-grande-y-barrancas-argentina-y-su-relacion. (2019)

Boninsegna, J. y Llop, A. Impactos y vulnerabilidad al cambio climático de los principales ríos de Mendoza y San Juan a partir de la evolución de los glaciares cordilleranos. La economía del cambio climático en la Argentina. *CEPAL-Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 161*. (2015)

Cara, L., Masiokas, M., Viale, M., Villalba, R. Análisis de la cobertura nival de la cuenca suprior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. *Meteorológica, 41, 21-36*. (2016)

Lascano, M. E. y Velasco, I. Estimación de cobertura de nieve en los Andes Centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuencas de los ríos Colorado y Neuquén. www.infraestrura.com.ar. (2007)

Lauro, C. Vich, A. y Moreiras, S. M. Variabilidad del régimen fluvial en cuencas de la región de Cuyo. *GEOACTA 40 (2), 28-51.* (2016)

Marin, C., Bertoldi, G., Premier, V., Callegari, M., Brida, C., Hurkamp, K., Tschierscha, J., Zebisch, M., and Notarnicola, C. USe of Sentinel-1 radar observations to evaluate snowmelt dynmic in alpine regions. *The Cryosphere, 14, 935-956* (2020)

Martini, A., Ferro-Famil, L., &Pottier, E. Snow extent discrimination in alpine areas from polarimetric and multi-frequency SAR data. *EAR Sel. Proceedings 5.* (2006)

Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C. y Araven, J. C. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *J. Climate 19 (24), 6334-6352*. (2006)

Nadir Arslan, A., Koskinen, J., Praks, J., Alasalmi, H., Kruopis, N., &Hallikainen, M. Retrieving snow water equivalent on C and L band. SAR data for dry snow. *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. IGARSS '98. IEEE International.* (1998)

Nagler T. Methods and Analysis of Synthetic Aperture Radar Data From ERS-1 and X-SAR for Snow and Glacier Applications. *Ph.D. Dissertation, University of Innsbruck, Austria.* (1996)

Nagler, T. &Rott, H. Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.38, 754-765. (*2000)

Nagler, T. &Rott, H. Snow classification algorithm for Envisat ASAR. Proc. of the 2004 *Envisat & ERS Symposium, Salzburg, Austria 6-10 September 2004 (ESA SP-572).* (2004)

Pasian, M., Espin-López, P. F., Premier, V., Notarnicola, C., and Marin, C. Identification of multi-temporal snow melting patterns with microwave radars. *IEEE 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).* (2020)

Pettinato, S. Santi, E. Brogioni, M. Paloscia, S. Pampaloni, P. Palchetti, E., Shi, J. Xiong, C. The potencial of Cosmo-Skymed SAR images in mapping snow cover and snow water equivalent. *IGARSS 2011. IEEE.* (2011)

Pettinato, S., Poggi, P., Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., &Crepaz, A. Mapping snow cover in alpine areas with Envisat/SAR images. Envisat and ERS. *Symposium, September 6-10. Proceeding ESA ISBN 92-9092-883-2 Salzburg, Austria.* (2004)

Rott, H. Heidinger, M. Nagler, T. Cline, D. & Yueh, S. Retrieval of snow parameters from ku-band and x-band radar backscatter measurements. *IGARSS 2009. IEEE.* (2009)

Salcedo, A.P. and Cogliati, M.G. Snow Cover Area Estimation Using Radar and Optical Satellite Information. *Atmospheric and Climate Sciences, 4, 514-523.* (2014)

Shi, J. & Dozier, J. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-sar. Geoscience and RemoteSensing, *IEEE TransactionsonVolume: 38, Issue: 6.* (2000)

Shi, J. & Dozier, J. Inferring snow wetness using C-band data from SIR-C´s polarimetric synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. (1995)

Solorza, R. Cogliati, M. Salcedo, A.P. Notarnicola, C. Estimación del Área Cubierta de Nieve con datos SAR en banda L en un sector cordillerano de la Patagonia Argentina. *Rev. La Asoc. Geol. Argentina, vol. 73, pp. 421–429.* (2016)

Teverovsky, S. Notarnicola, C. Estimation of wet snow cover area with SAR imagery in the basin of Tupungato River, Mendoza, Argentina. (2018)

POTENCIAL DE BACTERIAS DEGRADADORAS DE ACEITES VEGETALES COMO INÓCULO PARA BIOAUMENTO EN LA REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

Celene Sánchez Holmedilla[a], Fausto Silva[a], Gabriela Piperata[b], Debora Conde Molina[a]

[a]*Grupo de Biotecnología y Nanotecnología Aplicada, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional, Campana, ARGENTINA*
[b]*Termoeléctrica Manuel Belgrano S.A., Campana, ARGENTINA*

e-mail: dconde@frd.utn.edu.ar

RESUMEN

El medio ambiente es impactado de manera negativa debido a vertidos ocasionales de la actividad industrial. Cuando estos vertidos contienen compuestos insolubles como aceites y grasas, representan ser contaminantes de alto impacto. Este trabajo se centra en una problemática ambiental en la zona industrial de Campana, Buenos Aires, Argentina, donde una empresa de tratamiento de residuos de aceites vegetales generó un importante e incontrolado vertido de residuos en la Laguna 3 de la reserva natural privada El Morejón. Ante esto, surge la necesidad de abordar estrategias de biorremediación para sanear el área. El objetivo de este trabajo es estudiar las condiciones de crecimiento de consorcios bacterianos degradadores de aceites vegetales, previamente aislados de la Laguna 3, con vistas a su aplicación como inóculo en la estrategia de bioaumento. Para ello, las bacterias fueron crecidas en Erlenmeyers conteniendo medios de cultivo líquidos en diferentes condiciones, tales como: medio formulado con 2-5 % v/v mezcla de aceites vegetales -como única fuente de carbono-, agitación a 135-220 rpm, medio formulado con fuente de carbono alternativa de residuos de raíz batata (5% p/v). La mejor condición para los crecimientos de las bacterias fue un medio de cultivo formulado con 5 % v/v de mezcla de aceites vegetales, incubados a 135 rpm durante 5 días, alcanzando 7-9 g/L de biomasa. Además, esta condición mantuvo la presión de selección para que las bacterias conserven la capacidad de degradar aceites vegetales. La cantidad significativa de biomasa obtenida posiciona a estas bacterias autóctonas con un gran potencial para ser aplicadas como bioaumento en la estrategia de biorremediación sitio-específica para el saneamiento de la Laguna 3.

Palabras Clave: Bacterias degradadoras de aceites vegetales, Biomasa, Residuos agroindustriales, Bioaumento, Biorremediación.

INTRODUCCIÓN

A pesar de los beneficios que tiene la industria en la vida del ser humano como fuente económica, dicha actividad suele generar impacto sobre el medio ambiente causado por los vertidos ocasionales, afectando diversos ecosistemas incluyendo suelos, aguas superficiales y subterráneas. De hecho, la principal fuente de contaminación de ríos, bahías, lagunas y acuíferos es el vertido incontrolado de efluentes, los cuales proceden en su mayoría del sector industrial (Chipasa and Medrzycka, 2006; Arora 2018). En este sentido, los compuestos insolubles como las grasas y los aceites resultan ser contaminantes de gran impacto en los ecosistemas acuáticos, ya que forman una capa en la superficie del agua y disminuyen la tasa de transferencia de oxígeno en un proceso aeróbico, afectando a los organismos que viven en dicho sitio. En tanto que los aceites

que impactan sobre los suelos recubren las tierras de una película impermeable que destruye el humus vegetal (Azhdarpoor et al., 2014).
En la naturaleza los microorganismos son capaces de utilizar una amplia variedad de compuestos orgánicos como fuente de carbono y de energía para su crecimiento. Es así que las grasas y los aceites pueden ser hidrolizados y metabolizados por la acción microbiana. En la biodegradación de grasas y aceites pueden intervenir varias enzimas producidas por los propios microorganismos degradadores, siendo la lipasa la enzima más común. Esta enzima libera ácidos grasos, los cuales pueden ser biodegradados por una gama más amplia de microorganismos, incluidos aquellos que no producen enzimas lipolíticas extracelulares (Chandra et al., 2020).
Si bien los compuestos de las grasas y aceites son biodegradables por acción de la atenuación natural, se trata de un proceso muy lento que pone en riesgo el ecosistema afectado (Declercq et al., 2012). Por lo tanto, resulta un objetivo ecológico prioritario el desarrollo de tecnologías de alta eficiencia de remoción de contaminantes, las cuales sean compatibles con el medio ambiente. En contraparte, las técnicas físico-químicas para el saneamiento de contaminantes presentan un elevado costo económico y no son consideradas amigables con el medio ambiente, debido a la perturbación adicional que generan sobre la zona de tratamiento. Por ello, surgen estrategias alternativas para la eliminación de compuestos contaminantes, las cuales son ambientalmente correctas, simples y económicas. Aparecen así las técnicas biológicas de recuperación, que se incluyen dentro de la biorremediación (Azubuike et al., 2016). La biorremediación potencia el proceso natural de la biodegradación. Es decir que se trata de una tecnología en la que intervienen organismos vivos para reducir o eliminar riesgos medioambientales resultantes de la acumulación de compuestos xenobióticos.
La biorremediación ha probado su efectividad en la descontaminación y recuperación de sitios contaminados con compuestos orgánicos. Dado que la eficacia de la biodegradación de los contaminantes puede verse limitada por la cantidad y la especie de los microorganismos degradadores, frente a esta situación, una estrategia frecuentemente utilizada es el bioaumento. La cual consiste en introducir microorganismos para aumentar o acelerar la degradación del contaminante (Juwarkar et al., 2010).
En este sentido, este trabajo de investigación se enfoca en la problemática de contaminación de la Laguna 3 (-34.194522, -59.012097) ubicada en la reserva natural privada El Morejón (Bauni et al., 2019), perteneciente a la empresa Central Termoeléctrica Manuel Belgrano. Esta laguna se encuentra altamente contaminada por compuestos de aceites, como consecuencia del vertido no controlado por parte de una empresa vecina que realiza tratamientos de residuos provenientes de la industria aceitera.
El objetivo de este trabajo es estudiar las condiciones de crecimiento de consorcios bacterianos degradadores de aceites vegetales, previamente aislados de la Laguna 3, con vistas a su aplicación como inóculo en la estrategia de bioaumento sitio-específica.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se evaluaron las condiciones de crecimiento de 4 cultivos bacterianos mixtos, denominados L3-M1, L3-M2, L3-M3 y L3-M4, autóctonos de la Laguna 3 (Sánchez Holmedilla et al. 2022). Para ello, las bacterias fueron cultivadas en frascos Erlenmeyer de 250 mL, conteniendo 50 mL de medio salino mínimo (MSM) suplementado con fuente de carbono. Los cultivos se incubaron a 25°C y a 135 rpm en un agitador orbital, durante 7 días. En primera instancia se evaluaron los crecimientos de los cultivos en dos fuentes de carbono alternativas, una mezcla de aceites vegetales y residuos de raíz batata, a una concentración de 5 %. En una etapa posterior, se ensayaron los crecimientos de los cultivos a dos concentraciones distintas de la mezcla de aceites vegetales, siendo 2 y 5 %

v/v. Finalmente los crecimientos de los cultivos se evaluaron en MSM + mezcla de aceites vegetales (5 % v/v) a dos velocidades de agitación, 135 y 220 rpm. En todos los ensayos la biomasa de los cultivos se estimó mediante peso seco (g/L) (Conde Molina et al. 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siendo que los cultivos bacterianos mixtos L3-M1 L3-M2, L3-M3 y L3-M4 fueron previamente aislados de la Laguna 3, en condiciones de selección en un medio compuesto por MSM + mezcla de aceites vegetales (5 % v/v), se evaluó la capacidad de crecimiento de cada uno de estos cultivos en el mismo medio de selección. Alternativamente, se evaluaron los crecimientos de los cultivos en un MSM suplementado con residuos de raíz de batata (5 % p/v) como fuente de carbono, siendo que este residuo se encuentra disponible en la región agroindustrial de la Laguna 3. Los resultados mostraron que el crecimiento fue significativamente mayor en los cultivos crecidos en el medio conteniendo la mezcla de aceites vegetales (7-9 g/L), en comparación con el medio formulado con residuos de raíz de batata (5-6 g/L) (Figura 1). Este efecto se observó en todos los cultivos bacterianos mixtos.

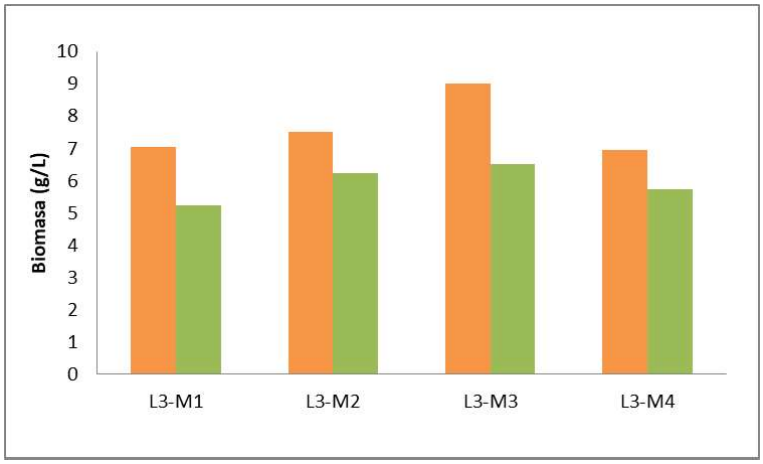


Figura 1. Biomasa obtenida de los cultivos bacterianos mixtos L3-M1 L3-M2, L3-M3 y L3-M4 crecidos en MSM + mezcla de aceites (5% v/v) (■) y en MSM + residuo de raíz de batata (5% v/v) (■).

A continuación se evaluaron los crecimientos bacterianos ensayando dos concentraciones de mezcla de aceites vegetales. Es decir en MSM + mezcla de aceites vegetales (2 % v/v) y en MSM + mezcla de aceites vegetales (5 % v/v). La figura 2 muestra los resultados de los crecimientos de todos los cultivos a ambas concentraciones. En el caso de los ensayos en MSM + mezcla de aceites vegetales (2 % v/v) los resultados de biomasa mostrada se obtuvieron a los 7 días, momento en que los cultivos alcanzaron la fase estacionaria. Mientras que los resultados mostrados en MSM + mezcla de aceites vegetales (5 % v/v) demuestran los valores de biomasa registrados a los 5 días. Esto evidencia que cuando L3-M1 L3-M2, L3-M3 y L3-M4 crecieron a la concentración de mezcla de aceites de 2 %, los crecimientos fueron más lentos, ya que tardaron dos días más en alcanzar la fase estacionaria, en comparación al medio que contenía mezcla de aceites de 5 %, siendo en este último de 5 días el periodo en llegar a la fase estacionaria. Además se obtuvieron significativamente valores superiores de biomasa en 5 % (7-9 g/L) en relación a 2 % (5-6 g/L). Por lo tanto, MSM + mezcla de aceites vegetales (5 % v/v) confirió mayores

crecimientos y en tiempos más cortos para todos los cultivos bacterianos mixtos, en relación con MSM + mezcla de aceites vegetales (2 % v/v).

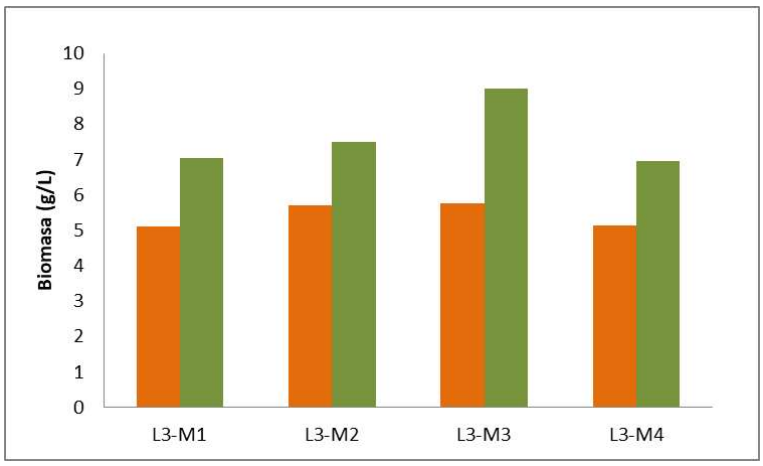


Figura 2. Biomasa obtenida de los cultivos bacterianos mixtos L3-M1 L3-M2, L3-M3 y L3-M4 crecidos en MSM + mezcla de aceites (2% v/v) (■) y en MSM + mezcla de aceites (5% v/v) (■).

Por último, los cultivos bacterianos mixtos en MSM + mezcla de aceites vegetales (5 % v/v) se incubaron a dos velocidades de agitación, a 135 rpm (aplicada en los ensayos anteriores, figura 1 y 2) y a 220 rpm. En estos ensayos pudo comprobarse que los crecimientos fueron significativamente mayores cuando los cultivos fueron sometidos a 135 rpm (7-9 g/L), en comparación con 220 rpm (2-3 g/L, excepto L3-M3 que generó 7 g/L). Si bien el efecto del tamaño de las gotas de la mezcla de aceites podría modificarse a una mayor velocidad de agitación, como el caso de 220 rpm, donde la interfaz agua-aceite en los cultivos podría mejorar la disponibilidad del aceite, en nuestro caso de estudio no se observó una mejora de la producción de biomasa debido al aumento de la velocidad de agitación. Sino que al contrario, los mayores registros de biomasa se obtuvieron a 135 rpm para todos los cultivos bacterianos mixtos.

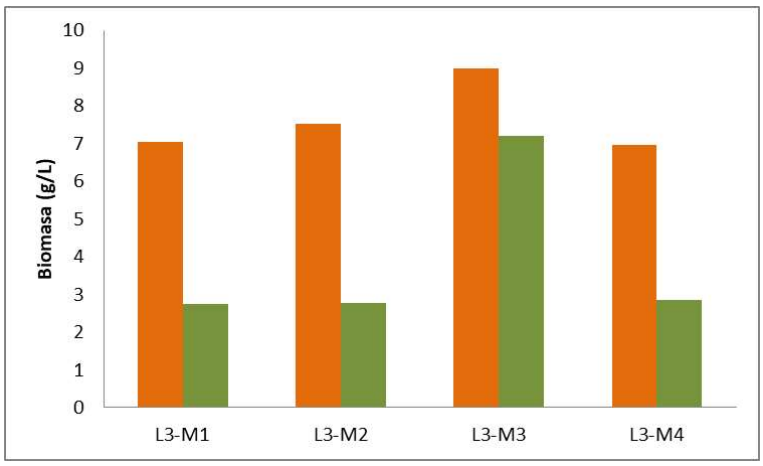


Figura 3. Biomasa obtenida de los cultivos bacterianos mixtos L3-M1 L3-M2, L3-M3 y L3-M4 crecidos en MSM + mezcla de aceites (5% v/v) incubados a 135 rpm(■) y a 220 rpm (■).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

CONCLUSIONES

La condición más apropiada para maximizar la producción de biomasa de los cultivos bacterianos mixtos L3-M1 L3-M2, L3-M3 y L3-M4 fue un medio de cultivo formulado con MSM + 5 % v/v mezcla de aceites vegetales, incubados a 135 rpm durante 5 días, registrándose valores de 7-9 g/L. Además, la presencia de la mezcla de aceites vegetales mantuvo la presión selección para que las bacterias conserven la capacidad de degradar aceites vegetales. La importante biomasa obtenida de los cultivos bacterianos mixtos, principalmente para el caso L3-M3, posiciona a estas bacterias autóctonas con un gran potencial para ser aplicadas como bioaumento en la estrategia de biorremediación sitio-específica para el saneamiento de la Laguna 3.

REFERENCIAS

Arora, N. K. Bioremediation: a green approach for restoration of polluted ecosystems. *Environ. Sustainability* 1, 305–307 (2018).

Azhdarpoor, A., Mortazavi, B. and Moussavi, G. Oily wastewaters treatment using *Pseudomonas* sp. isolated from the compost fertilizer. *J. Environ. Health Sci. Eng*. 12, 77 (2014).

Azubuike, C. C., Chikere, C. B. and Okpokwasili, G. C. Bioremediation techniques-classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 32, 180 (2016).

Bauni, V., Bogan, S., Meluso, J. M., Holmer, M., and Giacchino, A. Primer inventario de vertebrados de la reserva natural privada El Morejón, Campana, provincia de Buenos Aires. *Rev. Mus. Argentino Cienc. Nat.* 21(2), 195-215 (2019).

Chandra, P., Enespa, R. S. and Arora P. K. Microbial lipases and their industrial applications: a comprehensive review. *Microb. Cell Fact.* 19, 169 (2020).

Chipasa, K.B. and Medrzycka, K. Behavior of lipids in biological wastewater treatment processes. *J Ind. Microbiol. Biotechnol.* 33(8), 635-45 (2006).

Conde Molina, D., Liporace, F. and Quevedo, C. Development of bioremediation strategies based on the improvement of biomass production from isolated strains in hydrocarbon contaminated soils and their application in bioremediation technologies. *Braz. J. Dev.*, 5 (7) (2019).

Declercq, I., Cappuyns, V. and Duclos Y. Monitored natural attenuation (MNA) of contaminated soils: states of an art in Europe – a critical evaluation. *Sci. Total Environ.* 426, 393-405 (2012).

Juwarkar, A. A., Singh, S. K. and Mudhoo, A. A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Rev. Environ. Sci. Technol.* 9, 215-288 (2010).

Sánchez Holmedilla, C., Piperata, G. and Conde Molina, D. Aislamiento de bacterias degradadoras de aceites de origen vegetal provenientes de sitios contaminados. Fronteras en Nanobiotecnología III. Workshop Internacional. Buenos Aires, Argentina (2022).

EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA Y RIESGO ASOCIADO EN LAS LADERAS DE LOS CERROS SOLO Y TECHADO NEGRO, VALLE DEL GLACIAR TORRE, PROVINCIA DE SANTA CRUZ

Daniela Schmidt[a,b], Diego Winocur[ab] y Pierre Pitte[c]

[(a)] *Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.*
[(b)] *Instituto de Estudios Andinos "Don Pablo Groeber" (UBA-CONICET), Buenos Aires, ARGENTINA.*
[(c)] *Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET), Mendoza, ARGENTINA.*

e-mail: danielainesschmidt@gmail.com

RESUMEN

Durante las últimas décadas el glaciar Torre experimentó un paulatino retroceso de su frente y una notoria pérdida de masa, espesor y volumen de hielo, provocando la relajación de las laderas que lo contienen. Tanto la ladera norte del cerro Solo como la sur del cerro Techado Negro se encuentran desestabilizadas y son susceptibles a movimientos de remoción en masa. En este trabajo, se caracteriza y analiza la evolución temporal de los últimos quince años, 2007-2022, en ambas laderas para así contribuir al conocimiento de la tasa de movimiento en relación al retroceso glaciario y su influencia en el potencial proceso de desestabilización de laderas. Del análisis de los resultados se obtuvo que, en los últimos tres años, 2019-2022, la tasa de desplazamiento del material involucrado en la ladera del cerro Solo casi duplicó su tasa de movimiento en comparación con un período de tiempo cuatro veces mayor, tomado entre 2007-2019. Para la ladera del cerro Techado Negro las mediciones no arrojaron cambios significativos en el movimiento asociado a la escarpa principal, no obstante, se identificó la presencia de nuevas cicatrices y material deslizado que recubre la ladera. Sumado a lo anterior, los valores obtenidos para el período de 2019-2022, evidencian una pérdida de hielo glaciar que casi duplica el resultado obtenido para el período anterior de doce años, entre 2007-2019. Este escenario constituye un riesgo geológico ante la posible ocurrencia de un evento repentino que deslice grandes volúmenes de material al lago proglacial Torre, provocando una crecida súbita en el caudal del río Fitz Roy, que podría ocasionar daños aguas abajo, dentro de las instalaciones del Parque Nacional Los Glaciares y en la localidad de El Chaltén.

Palabras clave: Glaciar Torre, Deslizamiento, El Chaltén

INTRODUCCIÓN

El área de estudio comprende la cuenca del glaciar Torre/Grande, su lago proglaciario y el río Fitz Roy, dentro del Parque Nacional Los Glaciares (PNLG), en el suroeste de la provincia de Santa Cruz (ver Fig. 1). Dicho parque, cuenta con uno de los atractivos turísticos naturales más importantes de la provincia, que tiene a la localidad de El Chaltén como Capital Nacional del Trekking desde 1994 y es visitado por decenas de miles de turistas al año, siendo la principal actividad económica de la localidad.

El paulatino retroceso del glaciar Torre/Grande en las últimas décadas (Masiokas et al., 2015), ha ocasionado la relajación de las laderas que lo contienen, desestabilizando las

 ISBN: 978-987-1323-89-0

pendientes del valle y tornándolas susceptibles a movimientos de distinto tipo. Al menos desde el año 2007, es posible reconocer actividad tanto de la ladera norte del cerro Solo (Winocur et al., 2015), como de la ladera sur del cerro Techado Negro, identificada en el presente trabajo, constituyendo un riesgo frente a la posibilidad de desarrollo de un evento súbito que deslice grandes volúmenes de material al lago Torre. Este movimiento podría generar una ola que aumente repentinamente el volumen del lago, desarrollando una crecida y un flujo de agua anómalo en el río Fitz Roy por un desagote del mismo (GLOF, *Glacier Lake Outburt Flood*, por sus siglas en inglés). El objetivo del presente trabajo es relevar las unidades geomorfológicas activas ubicadas en las laderas del cerro Solo y Techado Negro, identificando los cambios temporales ocurridos en los últimos quince años (2007-2022). De esta manera, se intenta contribuir al conocimiento de la tasa de movimiento de las laderas que rodean al lago Torre en relación al retroceso glaciario y su influencia en el potencial proceso de desestabilización. Este análisis permitirá contribuir a la evaluación del riesgo a que un posible GLOF se desarrolle y pueda causar daños a los habitantes y turistas que visiten la zona, así como a la infraestructura.

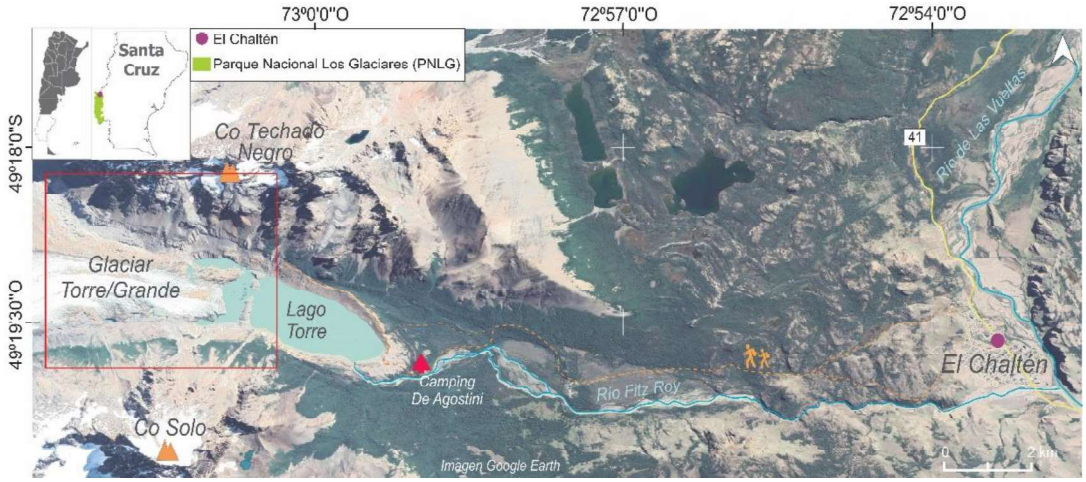


Figura 1. Ubicación del sector de estudio (recuadro rojo).

El primer trabajo relacionado al riesgo geológico con énfasis en los procesos de remoción en masa en las inmediaciones del glaciar Torre/Grande, fue llevado a cabo por Winocur et al. (2015a) quiénes caracterizaron el movimiento en masa activo de la ladera norte del cerro Solo con un volumen de 8 millones de m^3, entre material morénico inconsolidado y bosque. Posteriormente, Balbi et al. (2019), aportaron nuevos datos sobre el movimiento activo de la ladera, estimando un volumen de material ya deslizado de unos 13 millones de m^3. Los escenarios de inundación propuestos en ambos trabajos arrojan como resultado la afectación de los senderos de trekking del PNLG y el campamento de Agostini en primera instancia y, en segunda instancia, teniendo en cuenta escenarios con un máximo de volumen deslizado, la crecida podría alcanzar la localidad de El Chaltén afectando a la población e infraestructura presente ubicadas en cercanías del río Fitz Roy. Por lo anterior, además de los objetivos planteados anteriormente, como contribución particular de este trabajo se describe por primera vez el estado actual y su evolución en los últimos quince años de la ladera sur del cerro Techado Negro, en la cual se evidencia la presencia de un movimiento de remoción en masa activo.

METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consistió en recopilar y analizar bibliografía, cartografía, fotografías e imágenes satelitales con el fin de interpretar la evolución morfológica del paisaje durante los últimos quince años, entre 2007 y 2022, elaborando una interpretación de su evolución temporal. Durante el trabajo de campo se identificaron y caracterizaron las geoformas activas presentes en el valle del glaciar Torre/Grande. Para el análisis temporal de los procesos, se utilizaron imágenes satelitales Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea, disponibles en *Open Acces Hub* (https://apps.sentinel-hub.com), con una resolución espacial de 12,5 metros; así como imágenes de alta resolución de la Agencia Espacial Francesa (CNES-Airbus) disponibles en la plataforma *Google Earth Pro*, de entre 2,5 metros a 50 centímetros de resolución espacial, ambas de libre acceso. Asumiendo el error de la metodología, intrínseco en las imágenes satelitales trabajadas, a partir de la georeferenciación de las mismas y estableciendo cuatro puntos de control, determinados en diferentes sectores según rasgos geomorfológicos o geológicos notorios, que serán considerados puntos con error mínimo en sus coordenadas, se estimaron cinco parámetros para caracterizar la evolución del paisaje. En primer lugar, se determinó la posición de los movimientos identificados tanto en la ladera sur del cerro Techado Negro como la ladera norte del cerro Solo, teniendo en cuenta el descenso de la masa deslizada ladera abajo en dirección de máxima pendiente; el retroceso del frente del glaciar Torre/Grande y su pérdida de área y, por último, el incremento de área del lago Torre, incluyendo a este último los cuerpos de agua identificados en el margen sur del glaciar aunque aún no se encuentren conectados superficialmente. Para el análisis del paisaje se decidió contrastar el período 2007-2019 y 2019-2022 porque tanto la imagen satelital de 2007 como la de 2019 son imágenes disponibles de alta resolución espacial, siendo esta última la más reciente y, conjuntamente, para establecer una actualización desde el último trabajo realizado en el sector por Balbi et al. (2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primera instancia, en las imágenes satelitales del año 2007 ya es posible advertir, tanto en la ladera sur del cerro Techado Negro como en la norte del cerro Solo, escarpas bien definidas afectando al material morénico que conforman los laterales del valle glaciar y a la vegetación. En la ladera del cerro Techado Negro (ver Fig. 2), se evidencia la presencia de una escarpa principal, la cuál involucra casi exclusivamente el material morénico inconsolidado que recubre toda la ladera, sólo en el sector más oriental la escarpa se encuentra afectando, además, al bosque de *Nothofagus*. Esta presenta una longitud de, aproximadamente, 1500 metros, geometría semicircular y exhibe importantes procesos erosivos retrogradantes evidenciados por un carcavamiento activo e incisivo. Por debajo de la escarpa se desarrolla un amplio talud, donde aún es posible reconocer algunas crestas morénicas, que es alimentado por permanentes caídas de rocas, detritos y flujos de detritos. En cuanto a la evolución temporal de la ladera entre los años 2007 y 2019, no se registra un desplazamiento significativo en el movimiento del material asociado a la escarpa principal, pero si es importante advertir la presencia de nuevas escarpas que involucran un desplazamiento del material morénico hacia el pie de la ladera. La existencia de estas nuevas cicatrices afectando al material inconsolidado, preparan y disponen mayor cantidad de masa, incrementando el volumen total involucrado en el movimiento de remoción de la ladera del Techado Negro.

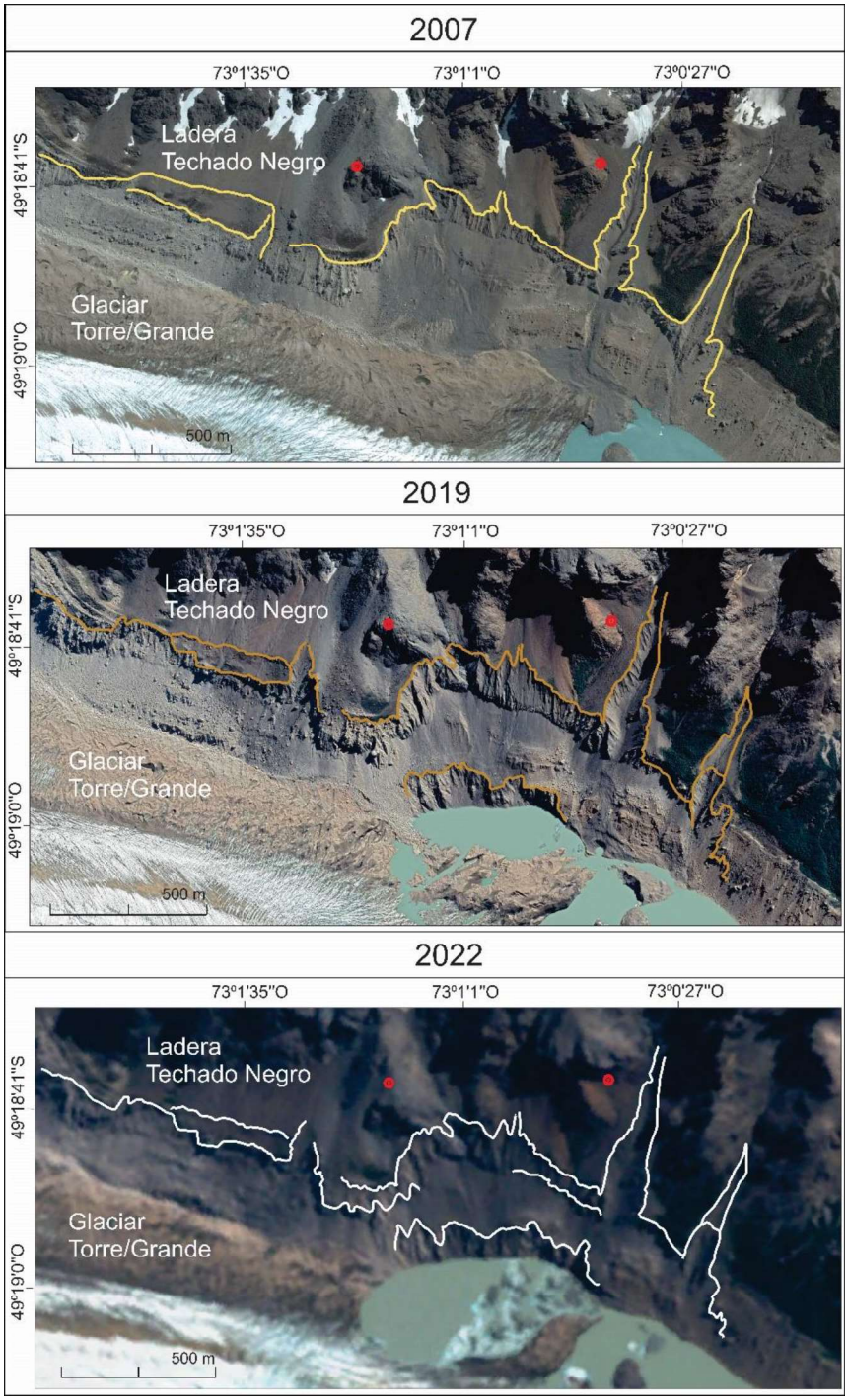


Figura 2. Evolución de la ladera sur del cerro Techado Negro. Se identifican las escarpas desarrollas en la ladera para el año 2007 (líneas amarillas), 2019 (líneas naranjas) y el año 2022 (líneas blancas). Puntos rojos: puntos de control.

Del mismo modo, en la ladera norte del cerro Solo (ver Fig. 3), la escarpa principal ubicada en la cabecera presenta un máximo de unos 1050 metros y morfología semicircular, mientras que en las escarpas secundarias se identifica una longitud de varias decenas a cientos de metros. Cabe aclarar que tanto las escarpas de menor longitud como las múltiples grietas de tracción observadas en el trabajo de campo, constituyen

potenciales superficies de ruptura, aumentando las probabilidades de ocurrencia de nuevos movimientos en el sector. En cuanto a la evolución de las paredes del valle glaciario entre los años 2007 y 2019 se identifica un descenso del material deslizado ladera abajo en dirección de la máxima pendiente e incremento en su desarrollo longitudinal de la escarpa principal ubicada en el cerro Solo.

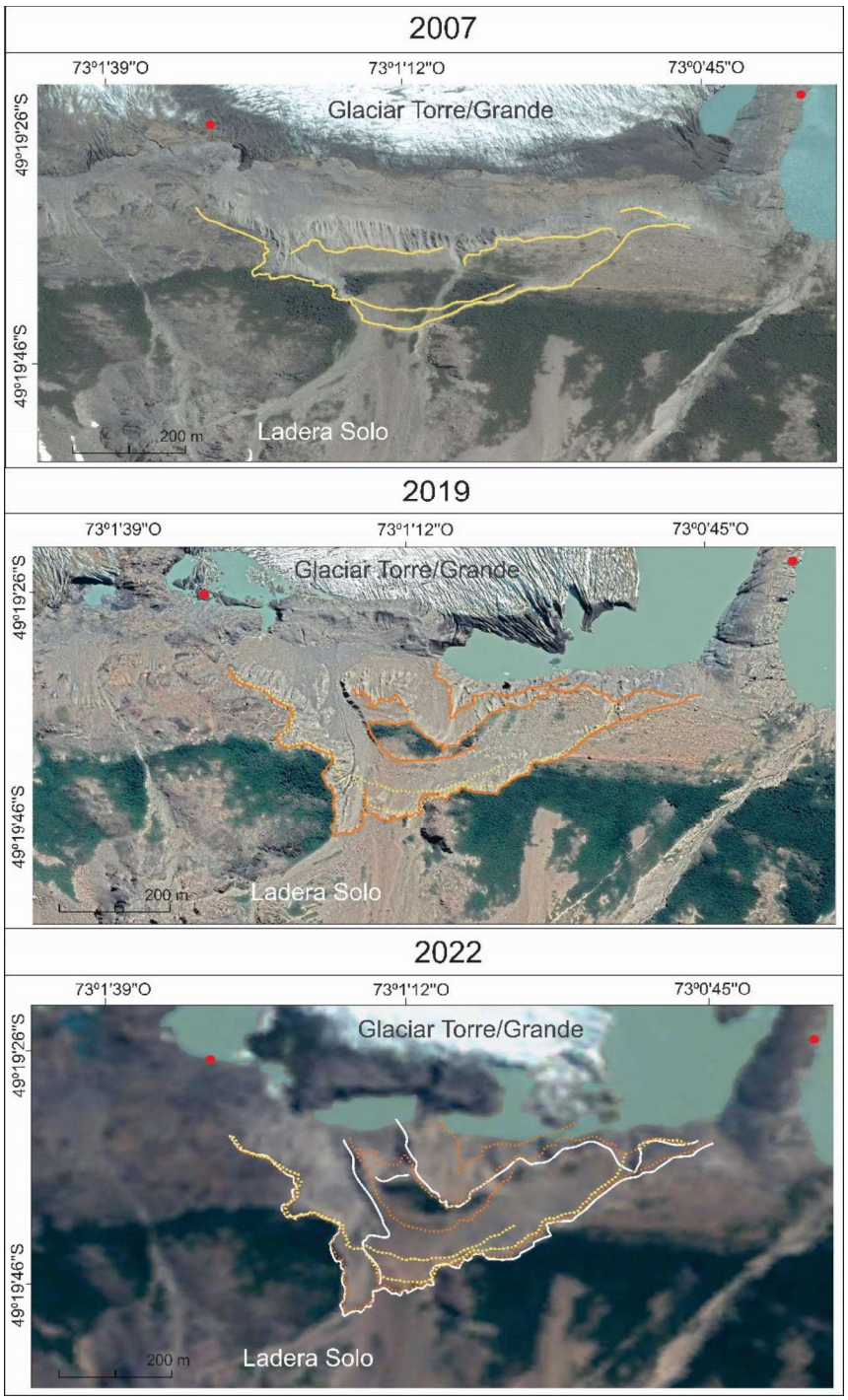


Figura 3. Evolución de la ladera norte del cerro Solo. Se identifican las escarpas desarrollas en la ladera para el año 2007 (líneas amarillas), 2019 (líneas naranjas) y el año 2022 (líneas blancas). Puntos rojos: puntos de control.

En la secuencia de imágenes analizadas, entre los años 2007 y mayo de 2022, se aprecian las diferentes posiciones del frente glaciar (ver Fig. 4), asociadas a su continua retracción y adelgazamiento. Para el año 2007, el frente del glaciar se encontraba en contacto con el promontorio rocoso pudiéndose apreciar, además, un mayor espesor de hielo. En la imagen del año 2019, la recesión del frente del glaciar Torre/Grande y su adelgazamiento queda evidenciado con el incremento del tamaño del lago Torre. El máximo retroceso del frente del glaciar medido, para este año, en su margen sur, alcanzó unos 220 metros, con respecto a su posición en el año 2007, ya sin presentar contacto con el promontorio rocoso. La ablación del hielo glaciar adyacente a las paredes del valle que lo contienen permitió la formación de cuerpos de agua en las márgenes, generando un descalce en el pie de las laderas y dando continuidad a los procesos de desestabilización ladera arriba. Algunos de estos cuerpos de agua identificados se encuentran desconectados del lago Torre y son limitados por el hielo glaciar, por un lado, y afloramiento rocoso o el material morénico inestable que cubre las laderas, por otro. En la imagen satelital de mayo de 2022 (ver Fig. 4), se observa una expansión del lago Torre ocupando amplios sectores al pie de las laderas donde antes, con respecto a la imagen del año 2019, había hielo glaciar o material morénico inconsolidado. Al mismo tiempo, se identifican nuevos cuerpos de agua desarrollados al pie de la ladera norte del cerro Solo, que aún no se encuentran conectados al lago proglaciario, pero implican una continua pérdida del sustento basal. Para este año, el máximo retroceso del frente del glaciar medido alcanzó cerca de 185 metros, con respecto a su posición en el año 2019; es decir, su tasa de retroceso casi se duplicó en comparación con el período 2007-2019, clara evidencia de que el retroceso del glaciar Torre/Grande se está acelerando.

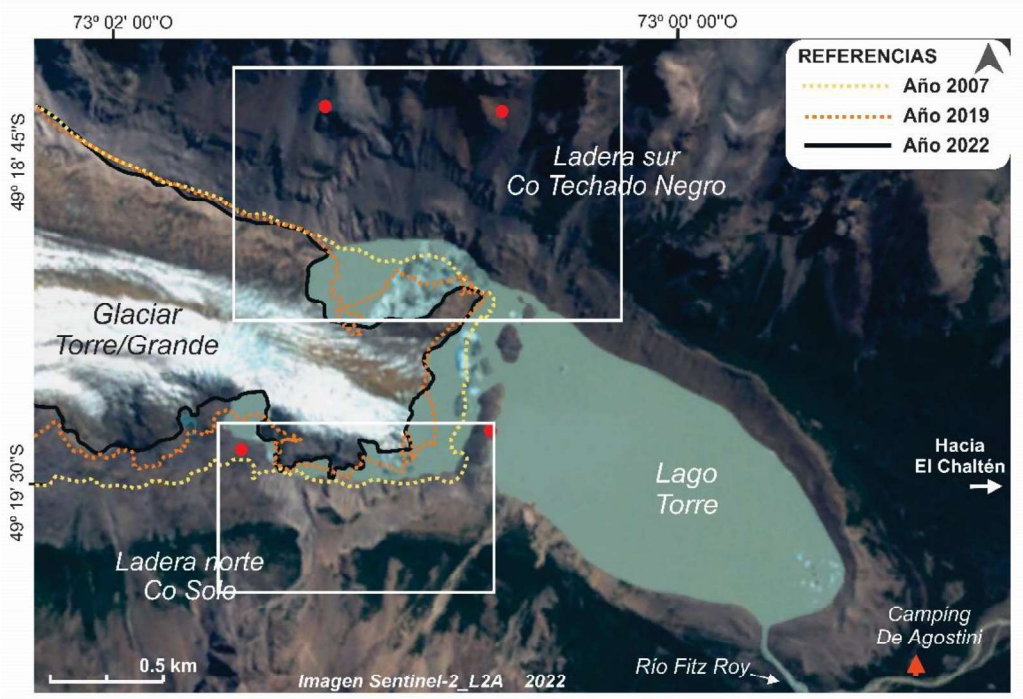


Figura 4. Evolución multitemporal del frente del glaciar Torre/Grande. Posición para el año 2007 línea amarilla, para el año 2019 línea naranja y para el año 2022 línea negra, a partir del análisis de imágenes satelitales de *Google Earth* e imágenes Sentinel-2 L2A. El mapa base corresponde a una imagen Sentinel-2 L2A de mayo de 2022.

Del análisis de los resultados, para el período de doce años, 2007-2019, se desprende que en la escarpa principal de la ladera norte del cerro Solo, el material deslizado incrementó su tasa de movimiento drásticamente, casi el doble, comparando los períodos 2007-2019 y 2019-2022, e incluso en este último, el volumen del material deslizado se fue incrementando pudiendo observarse como la escarpa principal asciende incorporando más material del talud (ver Fig. 3). Remarcando este primer resultado, en los últimos tres años se duplicó, aproximadamente, la tasa de desplazamiento del material involucrado en comparación con un período de tiempo cuatro veces mayor, tomado entre 2007-2019. Para la ladera sur del cerro Techado Negro las mediciones no arrojaron cambios significativos en el movimiento asociado a la escarpa principal, no obstante, se recalca la presencia de nuevas cicatrices y material deslizado que recubre la ladera. Sumado a ello, los valores obtenidos para el último período de tres años, 2019-2022, evidencian una pérdida de hielo glaciar que casi duplica el resultado obtenido para el período anterior de doce años, 2007-2019 (ver Fig. 4). Del mismo modo, los valores estimados para la tasa de incremento del área del lago Torre y cuerpos de agua asociados, indican un incremento mayor al doble, si se compara el período 2019-2022 con el período previo.

CONCLUSIONES

A partir del presente trabajo, se evidenció la relación entre el retroceso del glaciar Torre/Grande, con el concomitante aumento del volumen del lago Torre y la actividad de los deslizamientos que afectan a las laderas del cerro Solo y Techado Negro. Sumado a esto, se demuestra un incremento de los últimos tres años, 2019-2022, del retroceso glaciario, del volumen del lago y de la actividad de los deslizamientos pudiendo ser un riesgo potencial a tener en cuenta en relación a los turistas que visitan el parque como así también para la localidad de El Chaltén y sus habitantes. Es importante considerar que ciertos eventos pueden actuar como disparadores de los procesos de remoción en masa provocando un movimiento rápido y repentino del material, como ser un evento sísmico, precipitaciones intensas, erosión del pie de las laderas por acción del oleaje en el lago, entre otros; que pueden influir tanto directa como indirectamente en la desestabilización de la morena frontal que contiene y endica al lago Torre. Además, es de suma importancia remarcar que la ocurrencia de alguno de los anteriores fenómenos sobre una de las paredes del valle glaciario, la ladera norte del cerro Solo o la ladera sur del cerro Techado Negro, podría generar un oleaje que alcance la ladera de enfrente, desestabilizándola y provocando un aumento del volumen de material que ingrese al lago, generando así una ola de mayor porte y ante la cuál la morena frontal opondría menor resistencia. Por lo anterior, es menester realizar estudios futuros, en particular en la ladera sur del cerro Techado Negro, debido a la falta de caracterización en detalle de la misma y la relación existente entre el retiro del hielo glaciar y el probable desarrollo de un movimiento de remoción en masa súbito que involucre todo el material morénico inconsolidado que la recubre. Estos trabajos y futuras investigaciones deberían hacer hincapié en el riesgo geológico y la vulnerabilidad presentes, a fin de establecer programas de prevención y mitigación, así como sistemas de alerta temprana y planes de evacuación, educación y concientización ante estos peligros geológicos existentes.

REFERENCIAS

Balbi, A.B., J.M. Bedmar, J.F. Kaufman, J.A. Oliva y D.C. Villegas. Estudio de peligrosidad geológica de la localidad de El Chaltén y de procesos de remoción en masa de la ladera norte del cerro Solo. Santa Cruz, Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Peligrosidad Geológica N° 19: 83 p., Buenos Aires (2019).

Masiokas, M. H., Delgado, S., Pitte, P., Berthier, E., Villalba, R., Skvarca, P., et al. Inventory and recent changes of small glaciers on the northeast margin of the Southern Patagonia Icefield, Argentina. Journal of Glaciology, 61(227): 511-523 (2015).

Winocur, D., Goyanes, G., y Viera, G. Movimiento de remoción en masa activo y su riesgo geológico asociado en la ciudad de El Chaltén, provincia de Santa Cruz. Congreso Geológico Chileno: 136-139, La Serena, Chile (2015).

ANÁLISIS DE RIPIERAS UTILIZADAS PARA LA EXTRACCIÓN DE MINERALES DE 3° CATEGORÍA EN LA PROVINCIA DE MENDOZA

Cecilia J. Soengas, D. Ezequiel Bernedo Loria e I. Miqueas Butynski

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael, ARGENTINA

e-mail: csoengas@frsr.utn.edu.ar

RESUMEN

En la provincia de Mendoza la extracción de minerales de 3° categoría, denominados comúnmente áridos o agregados pétreos, se efectúa a través de la explotación de ríos o ríos secos llamados en la jerga ripieras. En estudios anteriores se examinó la legislación nacional y provincial con el fin de determinar los pasos a seguir para la apertura de una ripiera o cantera. Se estableció un número de ripieras en la provincia de Mendoza que son utilizadas en la industria de la construcción, en particular para uso vial. La Dirección Nacional de Vialidad (DVN) cuenta con el Manual de Evaluación y Gestión Ambiental de Obras Viales (MEGA II - 2007) herramienta que brinda el marco técnico y procedimientos para considerar y aplicar criterios ambientales en la planificación, el proyecto, la construcción, la operación y el mantenimiento de obras viales. El objetivo de este trabajo es conocer si la cantidad de ripieras encontradas están en funcionamiento o en abandono. En este último caso es necesario determinar el estado de las mismas con el fin de detectar si cumplen con lo propuesto por el MEGA II. Por el momento se cuenta con una base de datos proporcionada por la DNV, Distrito 4° Mendoza donde figuran algunas ripieras en uso vial. Anteriormente se analizó el último censo minero (2017) y un informe de la Dirección de Catastro. En una primera instancia, se quiere con esta información, poder describir la situación de las ripieras del sur mendocino utilizadas para la industrial vial, haciendo foco en las que se encuentra en abandono.

Palabras Clave: Ripieras, Extracción, Mendoza, Uso Vial

INTRODUCCIÓN

ÁRIDOS

Son los materiales más utilizados en la industria de la construcción luego del agua, ya que las viviendas, edificios, diques, escolleras, aeropuertos, puertos, vías férreas, carreteras, etc. cuentan en su seno con dichos materiales. En particular para la conformación de cualquier tipo de pavimento (hormigón, mezcla asfáltica, estabilizados, etc.) más del 70% del volumen lo ocupan los áridos y el resto es ocupado por el aglomerante (cemento, ligante asfáltico, agua, aditivos, etc.). Por lo cual el estudio de los áridos es de fundamental importancia no solo por la función estructural que cumplen sino también por el costo que implica la extracción, almacenamiento, transporte y selección de dicho material.

Los áridos pueden distinguirse entre naturales, artificiales o reciclados. Los naturales corresponden a rocas o material rocoso extraído de yacimientos naturales los cuales son sometidos a tratamientos o procesos mecánicos. Acá podemos dividirlos en granulares, que son los provenientes de depósitos aluvionales como las arenas y gravas; y los de trituración que provienen de macizos rocosos como los granitoides, cuarcíticos,

dolomíticos, entre otros. Los áridos artificiales, menos utilizados en la industria de la construcción, provienen de procesos industriales a los cuales se los somete a algún proceso de modificación físico – química como son las escorias. Por último, los áridos reciclados, recientemente incorporados en los distintos materiales de construcción, son el resultado de reciclar los residuos de demolición (sea un edificio, una carreta, etc.). (Coriale N., 2021).

La extracción de los áridos, dependiendo del lugar donde se encuentren, se realiza por medio de voladuras (macizos rocosos como es el caso de provincias como Buenos Aires y Córdoba que concentran cerca del 50% de la producción del país (Minería Argentina, Secretaría de Minería, 2020) o bien a través de la explotación de yacimientos aluvionales que se encuentran en el lecho de los distintos ríos, ríos secos y arroyos. (Butynski I.M. et al, 2021).

En la provincia de Mendoza la extracción de áridos se realiza a través de los yacimientos aluvionales, denominadas ripieras que se encuentran en el lecho de los distintos ríos del territorio provincial. Los ríos son de origen níveos que se forman por la unión de afluentes que descienden de la cordillera. De esta cadena montañosa nacen distintos ríos donde los mismos generan arrastre de material rocoso. El material se deposita a lo largo del cauce, según la pérdida que tenga el agua de arrastre. Cuanto más aumenta la longitud del afluente, se puede observar que los áridos aumentan su forma redondeada y disminuye en su tamaño, dado que las aristas blandas se desgastan por la fricción que sufren. Dentro de la provincia se encuentran los ríos Mendoza y Tunuyán al norte; Diamante y Atuel al centro; y el Colorado al sur. Son estos ríos los que fueron analizados para la ubicación de las distintas ripieras de la provincia (Butynski I.M. et al, 2021 y Soengas et al., 2021).

Cualquiera sea el tipo de explotación que se realice en la cantera, la pérdida de hábitat natural por la acción antrópica implica una problemática. No se caracteriza por ser una actividad altamente contaminante en comparación con otros sectores industriales, pero puede tener un alto impacto ambiental debido a que producen un cambio profundo y permanente en el paisaje y destruyen por completo el ecosistema preexistente (Roncallo L., 2017). Existen prácticas para mitigar los daños ambientales y restaurar los ambientes disturbados. Según la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, comúnmente se utilizan cuatro términos diferentes: restauración, rehabilitación, remediación y reclamación. Escapa a este trabajo ahondar en las definiciones de cada término, pero será tema contemplado en futuros estudios (Vidallé et al, 2011)

ASPECTOS AMBIENTALES EN LAS OBRAS VIALES

La Dirección Nacional de Vialidad (DNV) cuenta con el Manual de Evaluación y Gestión Ambiental de Obras Viales (MEGA II – 2007) el cual brinda el marco técnico y de procedimientos para la consideración y aplicación de criterios ambientales en la planificación, proyecto, construcción, operación y mantenimiento de la obra vial. Especialmente en la evaluación y control de sus eventuales efectos negativos. En la Sección I están las bases para la Gestión Ambiental Vial dirigido a consultores, empresas contratistas y concesionarios; reparticiones gubernamentales; organizaciones de la sociedad civil, público en general y toda aquella organización pública o privada vinculada con las diferentes etapas del ciclo de la obra vial. En la Sección II se plantean los objetivos y organización institucional de la gestión ambiental, por lo tanto, está dirigido al uso interno de las diferentes áreas de la DNV.

Las obras viales, en general, toman áridos próximos al lugar de emplazamiento de la obra, por lo cual, las canteras pueden ser fijas o móviles. En el MEGA II se citan las distintas etapas del ciclo de proyecto de una obra vial y es en la planificación cuando se debe definir, por parte de la empresa contratista (es quien será la encargada de la construcción de la obra) el área de influencia de la obra. Es en esta área donde la Contratista debe definir de dónde adquirirá los áridos necesarios para la construcción del pavimento. Esta identificación de la cantera o ripiera debe contar con estudios ambientales preventivos con el fin de minimizar los efectos adversos y detectar problemas previos a la realización de la obra. Se deben tener en cuenta la existencia o no de pasivos ambientales. Se define pasivo ambiental "al conjunto de danos ambientales realizados cuyos gastos compensatorios son transferidos por el causante a la sociedad a lo largo de su historia". (MEGA II, 2007). Son los pasivos ambientales los que se estudiarán cuando una ripiera salga de servicio y donde la Contratista debe hacer foco.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el propósito de conocer las necesidades a cubrir para la apertura de una ripiera, se estudió primero la legislación Nacional (Código Nacional de Minería, 1997 y Régimen de Gestión Ambiental de Agua, 2003) y luego la Provincial (Preservación del Medio Ambiente, 1992 y Regulación de Actividades Comprendidas en la Explotación de las Canteras, 2012).

El objetivo principal de este trabajo es valorar las ripieras de la provincia de Mendoza que se utilizan para uso vial. De ser posible cotejar el cumplimiento o no de lo que se propone en el MEGA II de la DNV.

Para ello se consultó el Catastro Minero del año 2017 de la provincia donde figuran todas la minas y canteras registradas, por lo tanto, la primera tarea fue identificar solo las ripieras. Esta labor se desarrolló a través del catastro minero (obviamente), información satelital y el conocimiento de la ubicación de algunas canteras en el norte y el sur provincial (ver Fig. 1). Además, utilizando imágenes satelitales, se pudieron reconocer zonas factibles en los ríos, ríos secos y arroyos, cerca de los centros urbanos que es donde en general se desenvuelve la actividad. Al observarse instalaciones potenciales de ripieras, se procedió a verificar si la misma se encuentra registrada en la base de datos de la Dirección de Minería o la existencia de una referencia en aplicaciones de georreferenciación (GPS) (Butynski et al., 2021)

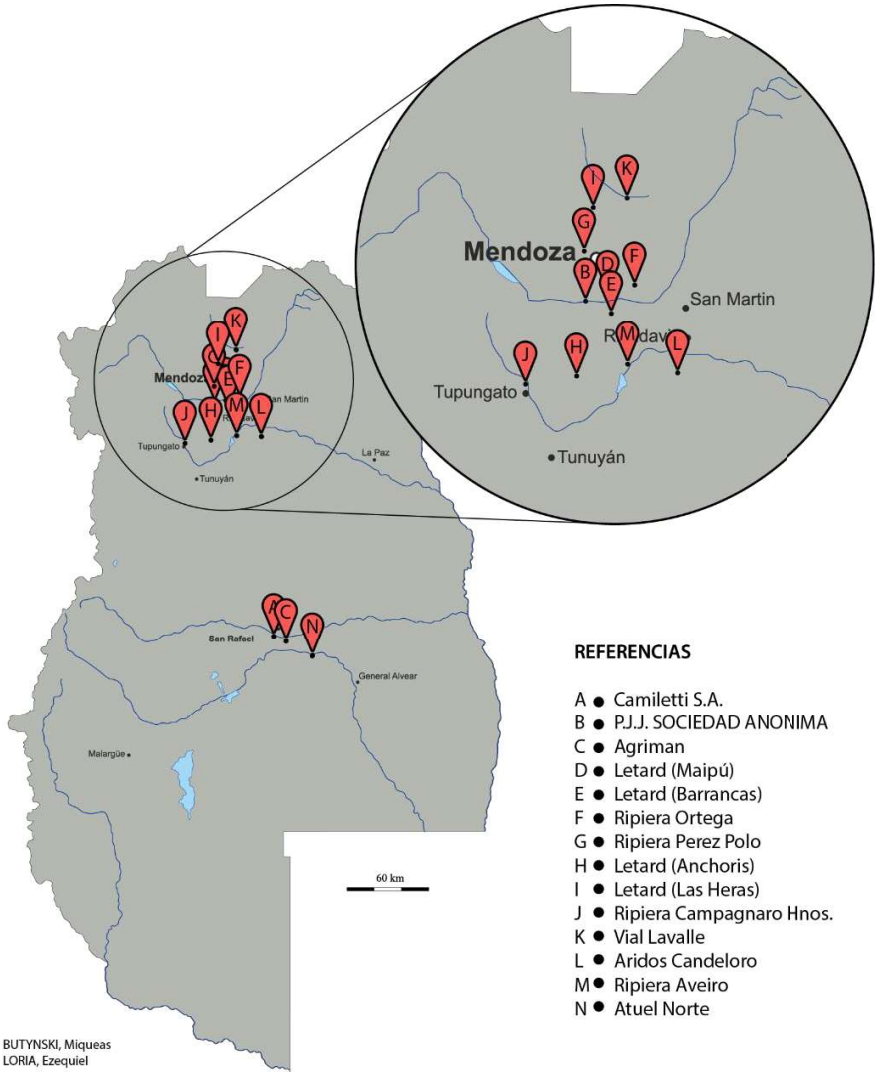


Figura 1. Representación geográfica de las principales canteras en la provincia de Mendoza
Fuente: Elaboración Propia

Esta información no permite observar si las canteras se encuentran en etapa de funcionamiento o de abandono, el paso siguiente es verificar su estado. Para lograr esto se planea realizar visitas a las ripieras y comprobar las condiciones en las que se hallan, tanto en la etapa de su vida, como así también en lo referido a la parte legal y ambiental. De ser posible se tomarán muestras de las diferentes zonas de extracción para cotejar si dichos áridos cumplen con lo especificado en el Pliego de la DNV para uso en pavimentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En trabajos anteriores (Bernedo Loria et al., 2022) se recopilaron las ripieras en estado de producción las cuales se reflejan en la Tabla I. Como se puede observar la concentración de ripieras está en concordancia con los centros poblacionales. A su vez se aprecia que en el norte las dos localidades con mayor cantidad de ripieras corresponden a Tupungato y Luján de Cuyo, esta última además concentra la destilería, polo petrolífero que utiliza los minerales de 3° categoría para su desarrollo. En el sur, la localidad de Malargüe es la que tiene mayor número de ripieras siendo también un polo petrolífero muy importante.

Tabla I. Ubicación y cantidad de ripieras en la provincia de Mendoza. Fuente: Elaboración propia

Ubicación	Departamento	Cantidad de Ripieras	Total de ripieras por ubicación
Norte	Godoy Cruz	5	79
	Las Heras	10	
	Luján de Cuyo	22	
	Maipú	9	
	Rivadavia	5	
	San Carlos	6	
	Tupungato	22	
Sur	General Alvear	1	65
	Malargüe	33	
	San Rafael	31	

Con información suministrada por la Dirección Nacional de Vialidad se cuenta con las ripieras en posible explotación para uso vial por parte de las diferentes Contratistas. Las rutas que se mencionan a continuación no tienen todos sus tramos adjudicados por lo que se supone que alguna de las canteras citadas serán potenciales para su uso (Tabla II)

La Ruta Nacional N° 7 es el corredor bioceánico, principal conexión terrestre entre el Mercosur y Chile. Articula, además, las provincias de Buenos Aires, Santa Fé, Córdoba, San Luis y Mendoza. El Proyecto denominado Sistema Cristo Redentor, contempla la construcción de la Variante Palmira (RN 7) y puentes sobre la RN 40 y la RP 15 en la provincial de Mendoza. Es por ello que desde el Distrito IV de la DNV nos facilitaron información sobre las posibles ripieras a utilizar en las futuras obras.

La Ruta Provincial N° 82 tiene como fin unir la ciudad de Cacheuta y el Corredor del Oeste por lo cual, la necesidad de contar con áridos de buena calidad es indispensable para la obra. También está en proceso la refuncionalización del Túnel Internacional Caracoles que habilitará la circulación de Chile a la Argentina teniendo en cuenta nuevas normativas internacionales. Existe una segunda etapa para ampliar y mejorar la calidad estructural del actual túnel el cual servirá para la circulación de Argentina a Chile. Esta es una de las obras de mayor envergadura del país actualmente.

En la RN° 40 se está trabajando en el denominado corredor Cuyo Mendoza – San Juan donde se prevén diferentes obras como la intersección con la Ruta Provincial 34; puentes sobre la Ruta Provincial 23 y un Puente intercambiador en la Ruta Provincial 34. Todas localidades de la provincia de Mendoza. Con estos detalles es que se hace foco en las ripieras instaladas en el norte de la provincial, quedando para estudios futuros la valoración del sur mendocino.

Tabla II. Ripieras de uso vial en el norte de la provincia. Fuente: Elaboración propia

Ruta Nacional	Nombre de la Ripiera	Total de Ripieras por Ruta
N° 40 Norte	Carlos R. Funes	8
	Oreste	
	Pircas Negras	
	El Quemado	
	El Borbollón	
	Capdevile Oeste	
	Virgen de Lourdes	
	Capdevila	
N° 7	Emiliano C	20
	San Cayetano	
	Hormiserv 4	
	Caucheuta Centro	
	Arroyo de las Minas	
	Las Avispas	
	Áridos Los Andes	
	Punta de la Loma	
	Áridos Pablo	
	Ruta 84	
	El Puesto	
	Áridos Italiano	
	Cantera del Oeste	
	Don Horacio	
	Juan Diego Junior	
	Río Seco Cacheuta	
	El Amuleto	
	Las Cuevas 1	
	Los Caracoles I y II	

Como se comentara anteriormente, estas son posibles ripieras a utilizar en alguna de las obras citadas. Es intención del equipo de trabajo verificar su estado legal, ambiental y técnico.

CONCLUSIONES

Se puede sintetizar que existen normativas regulatorias, tanto nacionales como provinciales en referencia a la explotación de las ripieras o canteras. Las nacionales

proponen la clasificación en la que encuentra la explotación de rocas pétreas. Por su parte, las leyes provinciales regulan el uso de los yacimientos, el procedimiento a realizar para la habilitación de una cantera y las actividades ambientales a tener en cuenta en el funcionamiento de la misma.

La DNV cuenta con el MEGA II brindado el marco teórico y la existencia de procedimientos para llevar a cabo las obras viales en sus distintas etapas (planificación, proyecto, construcción, mantenimiento y operación). Las empresas contratistas, antes de definir sus propuestas económicas, deben confeccionar un estudio de impacto ambiental (en nuestro caso focalizamos solo las canteras) en la zona de influencia de la obra. Es posible que la ripiera esté en funcionamiento o bien se deba comenzar con la explotación. Esto llevará a cabo otro tipo de estudios ambientales.

Se determinó la cantidad de canteras registradas pudiéndose verificar la localización de puntos georreferenciados en el mapa de la provincia. La cantidad de ripieras ubicadas en el norte es mayor a la del sur, como era de esperar, y en los departamentos donde existe mayor población y actividad del recurso es donde también coincide la mayoritaria concentración.

Se estima continuar con estudios en las diferentes ripieras localizadas con el fin de valorar la eficiencia legal, ambiental y técnica (esto sería a través de toma de muestras) de las mismas.

REFERENCIAS

Bernedo Loria, D. E., Butynski, I. M. and Soengas, C. J. Evaluación de Aptitud de Áridos procedentes de Yacimientos Aluvionales de la Provicnia de Mendoza, Según Especificaciones de la D.N.V. *IDETEC – 10° Congreso de Investigaciones y Desarrollos en Tecnología y Ciencia*. *978-987-8992-02-0 (2022)*.

Bonalumi, A. A. Publicación Especial de Agregados Pétreos de las Provincias de Buenos Aires y Córdoba. Publicación de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. 978-987-21766-2-4 (2011)

Butynski, I. M., Bernedo Loria, D. E. and Soengas, C. J. Obtención de Áridos por Extracción Directa en Yacimientos Aluvionales para ser Usados en Mezclas Asfálticas. *IDETEC – 9° Congreso de Investigaciones y Desarrollos en Tecnología y Ciencia*. *978-987-4998-69-9 (2021)*.

Coriale, N. Introducción a la Minería de Áridos. Caso Provincia de Buenos Aires Unidad 1 dentro de curso de posgrado: Estudio de la Factibilidad, Generación, Producción y Valoraci;on de la Calidad de los Áridos Provenientes de Yacimientos de la Provicnia de Buenos Aires Aplicados a Obras Civiles (2021)

Manual de Evaluación y Gestión Ambiental de Obras Viales. Ministrerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secreataría de Obras Públicas. Dirección Nacional de Vialidad (2007)

Soengas, C. J., Marinaro, A. F., Espinoza, E. and Obredor, A. D., *Análisis de la Legislación y la Explotación de Yacimientos Aluvionales de 3° Categoría en la Provincia de Mendoza*, XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 2022.

Vidalle, E., Gaido, M. F., López, H., Bonansea, A. J. and Seia, E. O. Gestión de Canteras Vialeas en Desuso en la Provincia de Córdoba, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, N° 26, Buenos Aires, Argentina* (2011).

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO PARA EL ESTUDIO NO INVASIVO DEL FLUJO DE AGUA EN MEDIOS POROSOS DURANTE PROCESOS DE DISOLUCIÓN

Mariangeles Soldi[a], Luis Guarracino[a] y Damien Jougnot[b]

[a]*Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, La Plata, Argentina, ARGENTINA.*
[b]*Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, 75005 Paris, FRANCIA.*

e-mail: msoldi@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

La caracterización del flujo de agua en el subsuelo es esencial para muchas aplicaciones ambientales, hidrológicas y de reservorios. Sin embargo, la mayoría de las técnicas clásicas requieren el acceso directo al objeto de estudio (por ejemplo, piezómetros) y sólo proporcionan información en un entorno reducido del lugar donde se realiza la medición. El método del potencial espontáneo (PE) provee datos que son directamente sensibles al flujo de agua ya que se basa en mediciones de diferencias de potencial eléctrico natural originadas en el subsuelo debido al flujo de agua que tiene lugar en los poros. Por ello resulta un método no invasivo que permite calcular el flujo de agua in situ. Para estudiar el flujo a partir de mediciones de PE, resulta necesario contar con un modelo que vincule las propiedades hidráulicas y eléctricas de los medios porosos. En este estudio presentamos el desarrollo teórico de un parámetro clave para cuantificar el potencial eléctrico generado por el flujo de agua denominado exceso de densidad de carga efectiva. Para calcular este parámetro asumimos que el espacio poral está representado por un conjunto de tubos y que el tamaño de los mismos aumenta durante el proceso de disolución. A partir de la descripción del arrastre de las cargas eléctricas en un solo poro, calculamos un valor del exceso de densidad de carga efectiva que es representativo de todo el medio poroso. Las expresiones matemáticas resultantes del modelo dependen del tiempo, así como también de las propiedades químicas del agua y de las propiedades hidráulicas del medio. Para validar el modelo propuesto, las predicciones teóricas se compararon con datos experimentales de laboratorio. Este nuevo modelo constituye una base para el uso del PE en el estudio de procesos tales como la cuantificación de aguas subterráneas o la dispersión de contaminantes.

Palabras Clave: Potencial Espontáneo, Flujo de Agua, Medios Porosos, Disolución, Hidrogeofísica.

INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo de agua en las zonas completa y parcialmente saturadas del subsuelo resulta de interés para diversas disciplinas relacionadas a temas hidrogeofísicos, medioambientales, de reservorios o de ingeniería civil. En el campo de la geofísica se han desarrollado métodos eléctricos que permiten caracterizar y medir las propiedades hidráulicas y el flujo de agua para diferentes escalas tanto espaciales como temporales de esas zonas. Entre ellos se destaca el método del potencial espontáneo (PE) que es un método geofísico pasivo basado en la medición de diferencias de potencial natural. La contribución a la señal del PE que resulta de particular interés a la hidrogeofísica es la

debida al potencial electrocinético dado que su origen está ligado al paso de un fluido a través de un medio poroso (Hunter 1981). El agua que ocupa el espacio poral contiene cargas eléctricas (iones positivos y negativos), cuando esta fluye por los poros arrastra una fracción de esas cargas generando una diferencia de potencial eléctrico que puede vincularse con el gradiente hidráulico que origina el movimiento del agua (Jougnot et al. 2020). Para realizar las mediciones de estas diferencias de potencial eléctrico, el equipamiento necesario son electrodos no-polarizables y un voltímetro. La sencillez de este equipo, así como la facilidad de implementación en el campo son importantes ventajas operativas de este método. Asimismo, el bajo costo económico y el hecho de no invadir el medio hacen de este método una alternativa muy prometedora para caracterizar y cuantificar el flujo de agua.

Los procesos de flujo y de transporte en el subsuelo están fuertemente controlados por la estructura y textura del suelo, es decir, por el tamaño y la forma de los poros. Cuando un fluido reactivo circula a través de un medio poroso, la estructura a escala microscópica de los poros se ve afectada significativamente por los procesos de disolución generando variaciones de superficie y volumen que se traducen en cambios en las propiedades medibles en la escala macroscópica como muestras de laboratorio o en el campo (p.ej. Tartakovsky et al. 2007). Estos procesos causan variaciones tanto en las propiedades hidráulicas del medio poroso como en las propiedades que describen al potencial electrocinético ya que el cambio en el tamaño de los poros produce una variación en el flujo de agua que circula por ellos. Este cambio en el flujo de agua afecta la cantidad de cargas eléctricas que son arrastradas por el mismo produciendo una variación en el potencial electrocinético y en consecuencia afectando la señal del PE durante procesos de disolución.

La capacidad de traducir las propiedades geofísicas medidas a partir del método de PE en los parámetros hidrogeofísicos de interés es de crucial importancia para obtener resultados eficientes a partir de la utilización de este método. Por este motivo, resulta fundamental contar con buenas relaciones petrofísicas que permitan una correcta interpretación de la información brindada por las observaciones. El potencial electrocinético está directamente vinculado al flujo de agua a través de un parámetro denominado exceso de densidad de carga efectiva. En este trabajo se presenta un modelo teórico para estimar este parámetro durante procesos de disolución. Las expresiones obtenidas para estimar el exceso de densidad de carga efectiva son analíticas y cerradas. Estas expresiones fueron derivadas considerando un modelo de tubos capilares con una geometría de radio variable y un proceso de disolución que afecta en forma homogénea a todos los capilares que representan los poros.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El medio poroso es representado por un volumen elemental representativo (REV) conceptualizado por un cilindro de radio R_{REV} (m) y longitud L (m). El espacio poral del REV se representa mediante un conjunto de tubos capilares constrictivos donde cada poro se define como un tubo cilíndrico de radio R (m), longitud l (m) y tortuosidad τ ($\tau = l/L$, adimensional) con una variación sinusoidal del radio (ver Fig. 1). Asumiendo que la geometría del poro tiene una longitud de onda λ (m), el radio del poro a lo largo de una longitud de onda puede describirse como (Soldi et al. 2022):

 ISBN: 978-987-1323-89-0

$$r(x) = \begin{cases} \frac{R}{2}(1+a) + \frac{R}{2}(1-a)\text{sen}\left(\frac{\pi x}{\lambda(1-c)}\right) & x \in [0, \lambda(1-c)) \\ \frac{R}{2}(1+a) + \frac{R}{2}(1-a)\text{sen}\left(\frac{\pi(x-\lambda(1-2c))}{\lambda c}\right) & x \in [\lambda(1-c), \lambda) \end{cases} \quad (1)$$

donde a y c son parámetros geométricos adimensionales que definen la constrictividad. Estos parámetros varían entre 0 y 1, y se asume que la geometría poral definida se repite una cantidad entera de veces a lo largo del capilar.

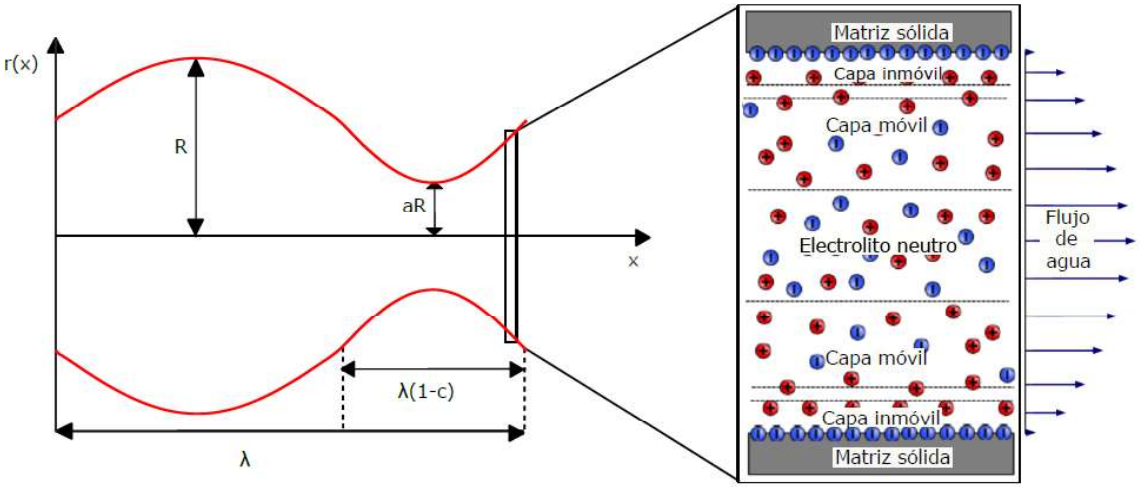


Figura 1. Representación esquemática de la geometría poral para una longitud de onda (panel izquierdo) y de la distribución de capas en el modelo de doble capa eléctrica (panel derecho).

Los radios de los poros en el REV varían entre un valor mínimo $R_{mín}$ (m) y uno máximo $R_{máx}$ (m), y el número total de poros con radio mayor a R se asume que obedece la siguiente ley fractal (p.ej. Yu et al. 2003, Soldi et al. 2022):

$$N(R) = \left(\frac{R_{\text{REV}}}{R}\right)^D \quad (2)$$

siendo D (adimensional) la dimensión fractal que varía entre 1 y 2. El número de poros cuyo tamaño se encuentra en el rango (R, R+dR) se obtiene diferenciando la Ec. 2:

$$-\text{dN}(R) = R_{\text{REV}}^D \text{DR}^{-D-1}\text{dR} \quad (3)$$

El flujo de un fluido reactivo en el conjunto de tubos capilares produce variaciones en la estructura de cada capilar, es decir en su volumen y en su área superficial. Asumiendo una disolución uniforme de los poros, los cambios en la geometría poral pueden describirse a partir de considerar que la variación del volumen de cada poro con respecto al tiempo es proporcional al área superficial del mismo que se encuentra en contacto con el fluido y a la tasa de disolución (Freedman et al. 2004; Guarracino et al. 2014). Bajo esas consideraciones, la evolución del radio de un poro con el tiempo durante un proceso de disolución se puede expresar como:

$$R(t) = R(t_0)e^{\beta(t-t_0)} \quad (4)$$

donde t_0 (h) es el tiempo inicial de la disolución y β (h^{-1}) es un factor que depende de los parámetros de la geometría, a y c, y de la tasa de disolución α (h^{-1}). El factor β se expresa como:

$$\beta = \frac{\alpha[4\pi(1+a)c+(1-a)(1-2c)]}{2\pi(1+a)^2+\pi(1-a)^2+8(1-a^2)(1-2c)}. \quad (5)$$

 ISBN: 978-987-1323-89-0

La porosidad del medio ϕ (m^3/m^3), para un tiempo dado durante el proceso de disolución, se calcula a partir de su definición. Para ello se considera la contribución del volumen de cada uno de los capilares para calcular el volumen total de poros y el volumen del REV obteniéndose la siguiente expresión:

$$\varphi = \frac{\tau \mathrm{DR}_{\mathrm{REV}}^{D-2} f_v}{(2-D)} \left(R_{\mathrm{máx}}^{2-D} - R_{\mathrm{mín}}^{2-D}\right) \tag{6}$$

donde

$$f_v = \frac{(1+a)^2}{4} + \frac{(1-a)^2}{8} + \frac{(1-a^2)(1-2c)}{\pi} \tag{7}$$

El factor f_v (adimensional) cuantifica la reducción en la porosidad debida a la presencia de las reducciones periódicas en geometría poral con respecto a la porosidad de un medio poroso que considera un modelo de capilares de radios constantes.

La permeabilidad del REV k (m^2) se obtiene a partir del cálculo del flujo volumétrico a través del REV para un tiempo fijo durante la disolución. Por un lado, este flujo se calcula considerando la contribución de cada uno de los poros (escala microscópica). Por otro lado, el flujo volumétrico se puede obtener a partir de la ley de Darcy (escala macroscópica). Mediante la comparación de ambas expresiones es posible obtener la siguiente fórmula para la permeabilidad k:

$$k = \frac{\mathrm{DR}_{\mathrm{REV}}^{D-2} f_k}{8\tau(4-D)} \left(R_{\max}^{4-D} - R_{\min}^{4-D}\right) \tag{8}$$

donde

$$f_k = \frac{a^{3/2}\pi(1+a)^3}{2\pi(1+a)^2 - 4(1-a)(1-2c)^2\left(1-\sqrt{a}\right)^2}. \tag{9}$$

El factor f_k (adimensional) cuantifica la disminución en la permeabilidad producida por la presencia de las constrictividades en geometría poral. Notar que si $a = 1$, $f_v = f_k = 1$, las expresiones de las propiedades hidráulicas (Ecs. (8) y (9)) corresponden a la porosidad y la permeabilidad de un medio poroso en el que los poros se representan por capilares de radios constantes.

La evolución de estas propiedades durante un proceso de disolución puede estimarse considerando que los radios máximos $R_{máx}$ y mínimo $R_{mín}$ varían en función del tiempo (Ec. (4)), obteniéndose las siguientes expresiones para la porosidad y la permeabilidad:

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) e^{\beta(2-D)(t-t_0)} \tag{10}$$

$$k(t) = k(t_0) e^{\beta(4-D)(t-t_0)} \tag{11}$$

siendo $\phi(t_0)$ y $k(t_0)$ la porosidad y la permeabilidad al inicio del proceso de disolución, respectivamente.

El potencial electrocinético se origina por el acoplamiento entre el flujo de agua y la distribución de las cargas a escala microscópica. Considerando el flujo volumétrico en un capilar, el modelo de doble capa eléctrica (ver Fig. 1) y asumiendo la conservación de las cargas eléctricas en cada capilar, se obtiene una expresión para el exceso de densidad de carga efectiva para cada poro. Para calcular este parámetro a escala de REV, se realiza una promediación de flujo considerando la contribución de cada poro al flujo volumétrico total. El exceso de densidad de carga efectiva $\hat{Q}_v$ (C/m^3) en el medio poroso se describe como:

$$\hat{Q}_v = N_A e_0 C_w \left[\frac{-2e_0\zeta}{k_B T} - \left(\frac{e_0\zeta}{3k_B T}\right)^3\right] \frac{l_D^2 f_k}{\tau^2 f_v^2} \frac{\varphi}{k} \quad (12)$$

donde N_A (1/mol) es el número de Avogadro, e_0 (C) la carga eléctrica de un electrón, C_w (mol/m^3) la concentración iónica del agua, ζ (V) el potencial eléctrico del plano que separa la capa móvil de la inmóvil, k_B (J/K) la constante de Boltzmann, T (K) la temperatura y l_D (m) el espesor de la capa móvil.

Para estimar la variación del exceso de densidad de carga efectiva en el REV durante el proceso de disolución se considera el efecto de este proceso en las propiedades hidráulicas, es decir, en la porosidad y en la permeabilidad. Considerando las variaciones de estas propiedades durante la disolución (Ecs. (10) y (11)), la Ec. (12) se expresa como:

$$\hat{Q}_v(t) = \hat{Q}_v(t_0) e^{-2\beta(t-t_0)} \quad (13)$$

siendo $\hat{Q}_v$ (t_0) el exceso de densidad de carga efectiva en el tiempo inicial de la disolución y β el factor dado por la Ec. (5).

Resulta interesante notar que, en las expresiones para describir la variación temporal de la porosidad, la permeabilidad y el exceso de densidad de carga efectiva durante el proceso de disolución (Ecs. (10), (11), y (13)), los exponentes que se encuentran en esas expresiones son diferentes. Esto significa que la variación de la geometría poral del medio debida a un proceso de disolución afecta de forma distinta a cada una de estas propiedades.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se realiza un ajuste de las expresiones propuestas para estimar las propiedades hidráulicas (Ecs. (10) y (11)). La situación más apropiada para testear el modelo propuesto es contar con datos tanto de las propiedades hidráulicas como de las electrocinéticas para comparar simultáneamente las estimaciones de las distintas propiedades con los datos. Sin embargo, hasta la fecha, no hay disponibilidad de datos experimentales del exceso de densidad de carga efectiva durante procesos de disolución. Los datos utilizados para comparar el modelo son los obtenidos por Jové Colón et al. (2004) quienes estudiaron los efectos de disolución en una arena limpia. Con ese fin, los autores midieron la evolución temporal de la porosidad y permeabilidad en la muestra. Para testear el modelo propuesto, se ajustan las Ecs. (10) y (11) a los sets de datos de porosidad-tiempo y permeabilidad-tiempo, y a partir de los parámetros obtenidos para este ajuste se predicen los valores del exceso de densidad de carga efectiva durante la disolución. El cálculo de este parámetro requiere la determinación del exceso de densidad de carga efectiva al inicio de ese proceso para lo cual consideramos los valores de la concentración iónica, la temperatura y el radio del REV de Jové Colón et al. (2004), y el valor del potencial zeta se estimó a partir de la relación propuesta por Jaafar et al. (2009) que calcula ese potencial en función del valor de la concentración iónica.

El ajuste de los datos se realiza mediante el método de búsqueda exhaustiva minimizando el error medio cuadrático pesado entre los valores calculados y medidos de la porosidad y de la permeabilidad simultáneamente. Las Figuras 2(a) y 2(b) muestran el ajuste de las Ecs. (10) y (11) respectivamente, y la Figura 2(c) ilustra la predicción del modelo para el exceso de densidad de carga efectiva (Ec. (13)). Los valores de los parámetros del modelo obtenidos con el ajuste son: a = 0.24, c = 0.46, D = 1.46, τ = 1.80, $R_{mín}$ = 1.0x10^{-6} cm, $R_{máx}$ = 1.9x10^{-3} cm y α = 3.68x10^{-4} h^{-1}. Como se

muestra en las Figuras 2(a) y 2(b), la evolución temporal de los datos experimentales de porosidad y permeabilidad puede ser reproducida satisfactoriamente por el modelo propuesto. Resulta importante destacar que este estudio está enfocado en el efecto que producen los cambios de la geometría poral en las propiedades macroscópicas del medio. Por lo tanto, se desprecian las variaciones de otros parámetros durante el proceso, como por ejemplo en la concentración iónica. El modelo propuesto predice una magnitud decreciente del exceso de densidad de carga efectiva. Este resultado guarda relación con el cambio en el flujo volumétrico que circula por los poros, ya que la permeabilidad es una propiedad que puede aumentar más significativamente que la porosidad debido al incremento del radio del poro. Es decir que el poro es más amplio y menos constrictivo, como se muestra en la Figura 2(d).

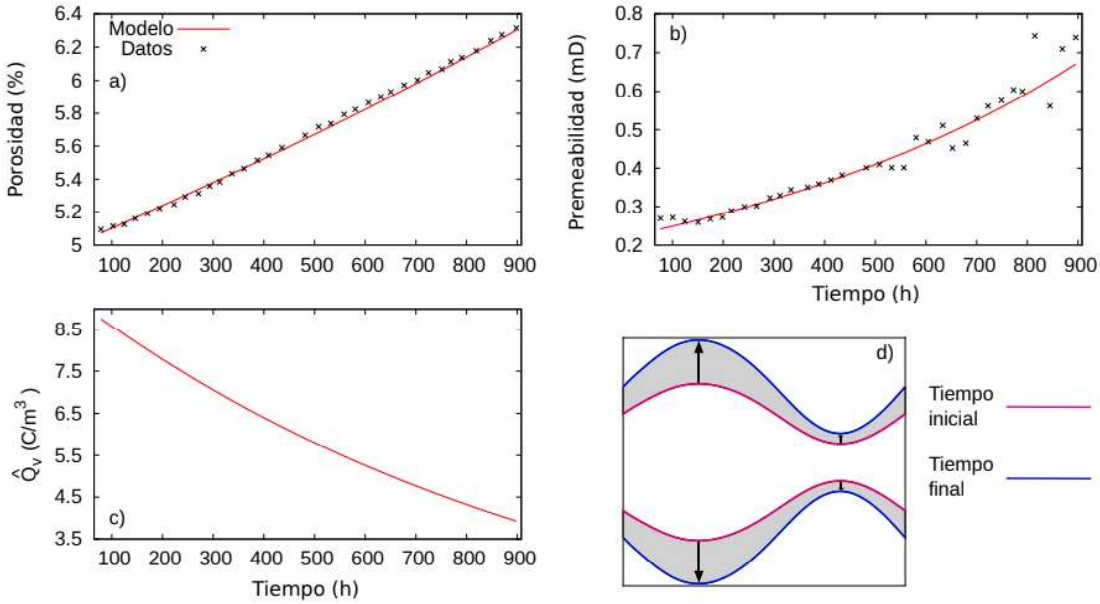


Figura 2. a. Ajuste del modelo a los datos experimentales de Jové Colón et al. (2004) correspondientes a: **a.** porosidad y **b.** permeabilidad. **c.** Predicción del modelo para los valores del exceso de densidad de carga efectiva durante el proceso de disolución. **d.** Representación de la variación de la geometría poral durante la disolución

CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un modelo teórico para estimar el exceso de densidad de carga efectiva durante un proceso de disolución. Este parámetro directamente relacionado al flujo de agua permite caracterizar el flujo a partir de las mediciones de potencial eléctrico realizadas con el método del potencial espontáneo. Para el desarrollo del modelo, el medio poroso se representa mediante un conjunto de tubos cilíndricos tortuosos con reducciones periódicas y con una distribución fractal de tamaño de poro. La disolución se incluye en el modelo considerando los efectos de ese proceso en la geometría poral propuesta, mientras que se desprecian las variaciones de los parámetros químicos.

El modelo propuesto proporciona un buen ajuste de los datos experimentales disponibles. Las estimaciones del modelo para las propiedades hidráulicas reproducen el comportamiento observado experimentalmente para estas propiedades durante todo el proceso de disolución y predice una disminución del valor del exceso de densidad de

carga efectiva con respecto al valor inicial de este parámetro al comienzo de la disolución.

Las expresiones del modelo pueden utilizarse para estimar el potencial electrocinético y así modelizar la contribución de este a la señal del potencial espontáneo para mejorar la interpretación de los datos provenientes de este método de prospección.

REFERENCIAS

Freedman, V. L., Bacon, D. H., Saripalli, K. P. and Meyer, P.D. A film depositional model of permeability for mineral reactions in unsaturated media, *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1414–1424 (2004).

Guarracino, L., Rötting, T. and Carrera, J. A fractal model to describe the evolution of multiphase flow properties during mineral dissolution*, Advances in Water Resources*, 67, 78–86 (2014).

Hunter, R. Zeta potential in colloid science: Principles and applications. New York, USA (1981).

Jaafar, M. Z., Vinogradov, J., and Jackson, M. D. Measurement 448 of streaming potential coupling coefficient in sandstones saturated with high salinity NaCl brine, *Geophysical Research Letters*, 36: L21306, (2009).

Jougnot, D., Roubinet, D., Guarracino, L., y Maineult, A. Modeling streaming potential in porous and fractured media, description and benefits of the effective excess charge density approach. In *Advances in Modeling and Interpretation in Near Surface Geophysics*, pages 61–96. Springer (2020).

Jové Colón, C. F., Oelkers, E. H. and Schott, J. Experimental investigation of the effect of dissolution on sandstone permeability, porosity, and reactive surface area, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4), 538 805–817 (2004).

Soldi, M., Guarracino, L. and Jougnot, D. The effect of pore geometry in constitutive hysteretic models for unsaturated water flow, *Environmental Fluid Mechanics*, pp. https://doi.org/10.1007/s10652–022–09891–0 (2022).

Tartakovsky, A. M., Meakin, P., Scheibe, T. D. and Wood, B. D. A smoothed particle hydrodynamics model for reactive transport and mineral precipitation in porous and fractured porous media, *Water Resources Research*, 43(5) (2007).

Yu, B., Li, J., Li, Z., Zou, M.: Permeabilities of unsaturated fractal porous media. *Int. J. Multiphas. Flow*, 29(10), 1625-1642 (2003).

PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN TÉRMICA Y DE CONFORT EXTERIOR PARA DIFERENTES LCZ EN UNA CIUDAD ÁRIDA

Sosa, M. B.[a], Colli, M. F.[a], Ruiz, M.A.[a] y Correa, E.[a]

[a]*Instituto de Ambiente Hábitat y Energía (INAHE), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - CCT Mendoza, ARGENTINA.*

e-mail: msosa@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

El cambio climático global y la alteración del clima urbano exponen a la población de las ciudades a mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos. Esto tiende a exacerbarse en ciudades de clima árido durante los meses de verano. Por ello, es importante entender cómo se comportan climáticamente las ciudades, en pos de planificar y proponer diseños urbanos acordes a los recursos naturales y las particularidades de cada sitio. El desarrollo y aplicación de herramientas fáciles de usar en la etapa de pre-diseño contribuye a los planificadores a mejorar las condiciones microclimáticas de las ciudades. El estudio se llevó a cabo en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), donde se clasificó al paisaje mediante las Zonas Climáticas Locales (LCZ) determinando regiones uniformes de cobertura del suelo, estructura, materiales y actividades humanas. El objetivo es analizar las posibilidades de rehabilitación urbana del AMM, centrándose en mejorar la temperatura y el confort térmico durante el periodo diurno en verano. Se utilizaron dos herramientas de fácil aplicación, que permiten a los urbanistas predecir la temperatura del aire exterior (DTair) y el confort térmico exterior (Tcomfort). Se probaron estas herramientas en un conjunto de doce escenarios (seis forestados y seis no forestados) respetando los valores geométricos y de cobertura superficial de cada LCZ. Los resultados demostraron que en las categorías "LCZ 3", "LCZ 6" y "LCZ 8" —que representan el 71,6 % del área total del AMM—, es recomendable mantener homogénea la forestación de calles y aumentar los valores de albedo horizontal. Sumado, se identifican un conjunto de indicadores y descriptores morfológicos y tecnológicos cuya intervención posibilitará optimizar la respuesta de los espacios abiertos, en términos de su temperatura y su grado de habitabilidad térmica durante las horas del día, contribuyendo al diseño y planificación bioclimática de los espacios públicos en zonas áridas.

Palabras Clave: Comportamiento térmico exterior, Confort térmico exterior, LCZ, Ciudad árida, Rehabilitación urbana.

INTRODUCCIÓN

Las poblaciones urbanas están expuestas a una frecuencia e intensidad cada vez mayor de fenómenos meteorológicos extremos debido a los cambios climáticos regionales y globales y a la alteración del clima urbano (Mandelmilch et al, 2020). Esto tiende a exacerbarse en las ciudades áridas durante los meses de verano. Por ello, es importante entender cómo se comportan climáticamente las ciudades para poder proponer un diseño urbano acorde a los recursos naturales y las particularidades de cada ciudad (Ruiz et al, 2017). La aplicación de herramientas fáciles de usar en la etapa de prediseño ayudaría a los planificadores urbanos a mejorar las condiciones microclimáticas de las ciudades.

Este trabajo se llevó a cabo en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM) en el centro oeste de Argentina, Región de los Andes (32°53′ S, 68°51′ W, 750 m.s.n.m.). La clasificación climática según Köppen-Geiger corresponde a un clima continental árido:

BWh o BWk, según la isoterma. Se caracteriza por inviernos fríos y veranos calurosos, con importantes amplitudes térmicas diarias y estacionales. El modelo urbano tiene una característica muy particular por estar ubicado en una región árida, las calles están forestadas con especies arbóreas de primera y segunda magnitud.

Por otro lado, Stewart I.D. y Oke T.R. (2012) han desarrollado un sistema de clasificación del paisaje que comprende la categorización de zonas uniformes en cobertura del suelo, estructura, materiales y actividades humanas. Estas zonas se denominan Zonas Climáticas Locales (LCZ por sus siglas en inglés). En el presente trabajo se utiliza la metodología LCZ para clasificar y analizar las zonas urbanas, a la vez de homologar el microclima de los distintos sectores de la ciudad de estudio.

A partir de la integración de las herramientas discutidas previamente, el objetivo de este trabajo es analizar las posibilidades de rehabilitación urbana del AMM, centrándose en mejorar el rendimiento térmico exterior y el confort diurno mediante la aplicación de dos herramientas de pre-diseño de fácil implementación.

MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Clasificación de LCZ en el AMM

Teniendo en cuenta las características del AMM, se desarrolló la clasificación LCZ utilizando la herramienta WUDAPT. Esta herramienta tiene como objetivo muestrear las LCZ, la cobertura del suelo y los tipos de uso del suelo (Ching J. et al, 2018), siguiendo tres pasos: (i) descargar datos y software, (ii) clasificación de LCZ y (iii) compartir los resultados a la comunidad científica.

Para descargar datos y software —paso 1— el sitio web proporciona imágenes Landsat para un grupo de ciudades. Debido a que el AMM no está incluido en este grupo, las imágenes satelitales Landsat-8 fueron obtenidas por cortesía del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), las cuales tienen una amplia cobertura territorial y adecuada resolución temporal. Para evitar la influencia de la copa de los árboles, que no permite la visualización del área debajo de ella, se seleccionan imágenes pertenecientes al invierno en el Hemisferio Sur (24 de julio de 2018 a las 02:43:13 UTC).

La clasificación de LCZ —paso 2— se realizó en dos etapas. En una primera etapa, para el procesamiento y análisis de las imágenes satelitales, se utilizó el software QGIS 3.2 “Bonn”. Las imágenes fueron proyectadas en POSGAR 07 (Posiciones Geodésicas Argentinas 2007) / Argentina 2. La calibración y corrección atmosférica de todas las bandas se realiza automáticamente mediante el método DOS1 y los niveles digitales se convierten a valores de reflectancia (Piccone, 2017). Al final de esta etapa se genera una superposición de bandas, lo que da como resultado un raster virtual ya que la entrada para la clasificación debe ser un archivo raster. Una vez fusionadas todas las bandas se realiza un corte del área de interés. En la segunda etapa se realizó la clasificación supervisada. Se generó un conjunto de clases con sus respuestas espectrales características para clasificar los píxeles mediante técnicas de teledetección. En esta clasificación se deben seleccionar muestras representativas para cada tipo de cobertura terrestre, cada LCZ definida por Stewart y Oke (2012) en este estudio. El software utiliza “áreas de entrenamiento” asociadas a diferentes firmas espectrales para la clasificación supervisada. En este estudio se utilizó el complemento "Semi-Automatic Classification Plugin" (SCP) de código abierto y gratuito para QGIS para realizar el proceso de clasificación. Luego, las áreas de entrenamiento son digitalizadas en la imagen por categorías LCZ utilizando fotografías de campo, fotografías aéreas, cartografía y especialmente el uso de Google Earth, para una delimitación más precisa de cada área.

Teniendo en cuenta que cada área está asociada a una clase LCZ la definición debe ser suficientemente representativa y homogénea. Después de seleccionar todas las áreas de entrenamiento, se ejecuta el algoritmo de clasificación, el software calcula las estadísticas elementales de cada categoría con los atributos de píxel para todas las bandas involucradas. El archivo de resultado o salida es un archivo raster (.tif) donde cada valor de píxel corresponde a una categoría previamente definida.

Distribución LCZ del MMA

Luego de usar la herramienta WUDAPT se obtuvo un mapa con las LCZ identificadas en el AMM. El área de estudio alcanzó un total de 69724 hectáreas pero sólo 16814 hectáreas pertenecen al AMM. El resto del área corresponde al piedemonte y zonas de cultivo ubicadas en el oeste y este de Mendoza, respectivamente. La Figura 1 muestra el mapa de clasificación LCZ del AMM con sus referencias. Al analizar cuantitativamente los datos, encontramos que las clases de LCZ más representativas son tres: "Abierto de baja altura - LCZ 6" (27,5 %), "Grandes construcciones bajas - LCZ 8" (22,7 %) y "Compacto de baja altura - LCZ 3" (21,4%). Asimismo, el mapa muestra que en el AMM no existen las clases LCZ 1, LCZ 4 y LCZ 7 (Colli et al., 2020). La Tabla I resume la proporción de cada clase LCZ.

Tabla I. Proporción de cada LCZ en el AMM.

Clase LCZ	**Área (ha)**	**Porcentaje (%)**
LCZ 2	770	4.5
LCZ 3	3602	21.4
LCZ 5	1491	8.8
LCZ 6	4632	27.5
LCZ 8	3819	22.7
LCZ 9	2500	14.8
Total	*16814*	*100.0*

En cuanto a la distribución de las clases más representativas, encontramos que las LCZ 3 y 6 se ubican principalmente en la zona centro, cabeceras de distrito y alrededores; y LCZ 8 está en la zona sur, coincidente con el sector de crecimiento de los barrios residenciales en las últimas décadas.

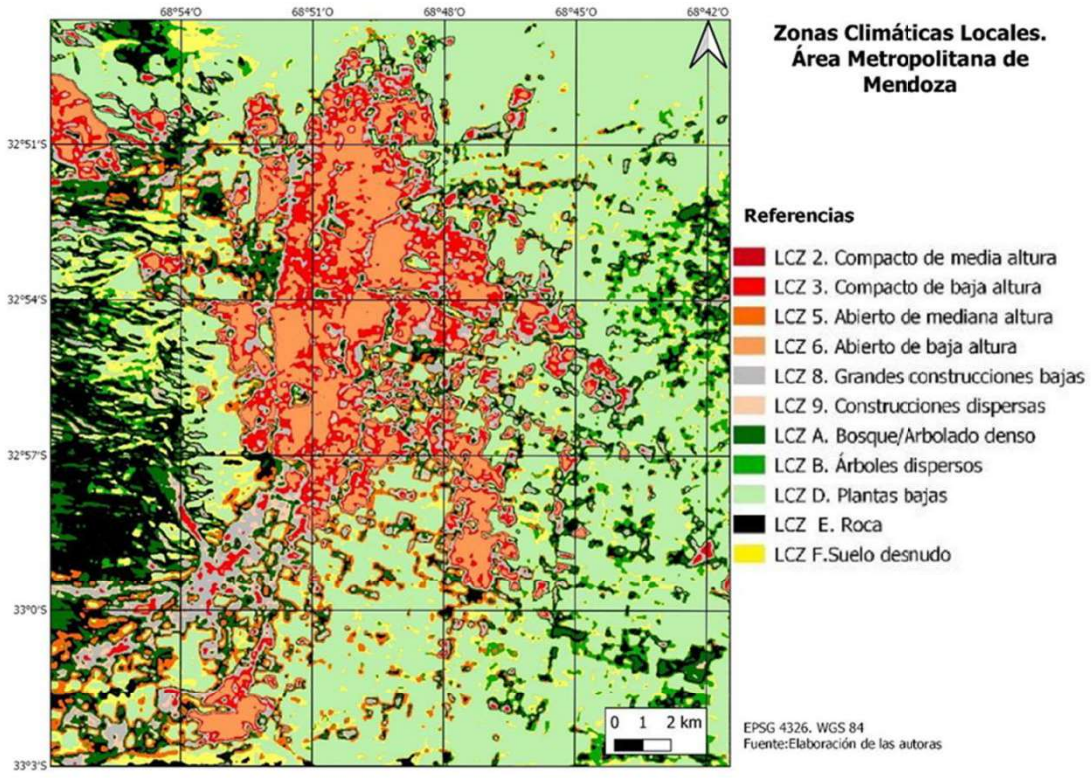


Figura 1. Mapa de clasificación de LCZ del AMM.

Monitoreo del comportamiento térmico de LCZ representativas

Los comportamientos térmicos fueron monitoreados en tres puntos del AMM que conforman una muestra representativa de las clases LCZ más comunes: "Abierto de baja altura - LCZ 6", "Grandes construcciones bajas - LCZ 8" y "Compacto de baja altura - LCZ 3" que sumadas representan el 71.6% de la superficie total del AMM. Se monitorearon canales viales urbanos con registradores de datos HOBO® (modelo H08-003-02; rango de medida -20°C a +70°C; precisión ±0.7°C a +21°C; resolución 0.4°C a +21° C) configurados para registrar cada 15 minutos. Se instalaron a 2 m de altura dentro de cajas perforadas de PVC blanco, con el objeto de evitar la irradiación de los mismos y asegurar una adecuada circulación de aire (Oke T., 2004). Los datos microclimáticos fueron registrados durante una campaña de medición de 20 días (21/12/2018 al 09/01/2019). Se seleccionó el 23 de diciembre como día de estudio debido a que las condiciones meteorológicas imperantes que corresponden a las típicas de un día de verano en una región árida: alta temperatura, condiciones de cielo despejado, viento moderado, baja humedad relativa y ausencia de precipitaciones. Los sensores se colocaron en el centro de la sección transversal de cada cañón urbano y se montaron en un poste de madera en las veredas. A fin de evitar la insolación, para los cañones orientados E-O, el poste estaba en el lado Norte, y para los cañones orientados N-S, los postes estaban en el lado Oeste.

Herramientas de pre-diseño de rehabilitación urbana

Para analizar las posibilidades de rehabilitación térmica de AMM, se utilizaron dos herramientas de pre-diseño fáciles de usar desarrolladas previamente (Ruiz et al, 2017; Ruiz et al, 2015). Estas herramientas son modelos estadísticos que permiten a los urbanistas predecir en una etapa inicial de diseño los siguientes desempeños en los espacios exteriores:

 ISBN: 978-987-1323-89-0

- Comportamiento térmico diurno (DTair)
- Confort térmico diurno (Tcomfort)

En cada herramienta de pre-diseño se utilizó un grupo de descriptores e indicadores urbanos divididos en cuatro categorías: (i) estructura del arbolado en alineación, (ii) morfología del cañón urbano, (iii) propiedades ópticas de los materiales y (iv) microclima.

La herramienta DTair incorpora una de las variables de la categoría (i) árboles por metro - T/m, dos variables de la categoría (ii) altura media del edificio - MBH y ancho del cañón urbano - UCW, una de la categoría (iii) albedo de la superficie horizontal - HA, y una de la categoría (iv) temperatura superficial diurna de las paredes - DTwall.

La herramienta Tcomfort incorpora dos variables de la categoría (i) permeabilidad solar - SP y número de árboles - NT, una de la categoría (ii) factor de visión del cielo - SVF y una de la categoría (iv) temperatura superficial de las paredes durante el día - DTwall. A continuación, la Tabla II muestra la ecuación de cada herramientas de pre-diseño, y la Tabla III los rangos de validez.

Tabla II. Herramientas de pre-diseño.

Herramientas de pre-diseño (*)	
DTair	29.18 - 6.20*T/m - 0.05*MBH - 0.13*UCW - 6.97*HA + 0.28*DTwall
Tcomfort	-491.59 - 12.90*SP - 4.86*NT + 313.23*SVF + 20.89*DTwall

(*) donde: DTair - comportamiento térmico diurno (°C), T/m - cantidad de árboles por metro; MBH - altura media de la edificación (m), UCW - ancho del canal vial (m), HA - albedo horizontal, DTwall - temperatura superficial diurna de las paredes (°C), SP - permeabilidad solar, NT - número de árboles, SVF - factor de visión de cielo.

Para el desarrollo de la herramienta Tconfort se utilizó el índice COMFA (Brown R.D. and Gillespie T.J., 1995). Ruiz M.A. y Correa E.N. (2015) determinaron que el COMFA es el índice con mejor capacidad predictiva en verano ya que considera la atenuación de la radiación solar por parte de los árboles.

Tabla III. Rangos de validez.

Rangos de validez	
T/m	0 - 0.29
MBH	3 - 31 m
UCW	14 - 30 m
HA	0.2 - 0.4
DTwall	27 - 36ºC
SP	0.1 - 1
NT	0 - 30
SVF	0.27 - 0.88

 ISBN: 978-987-1323-89-0

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajuste de las herramientas de pre-diseño urbano

La Figura 2 muestra el comportamiento térmico del día seleccionado (23/12/2018) para las 3 LCZ representativas.

Analizando el comportamiento térmico podemos ver que el punto LCZ 8 es el más caliente desde el mediodía, y los puntos LCZ 3 y LCZ 6 se mantienen más frescos y con comportamientos similares.

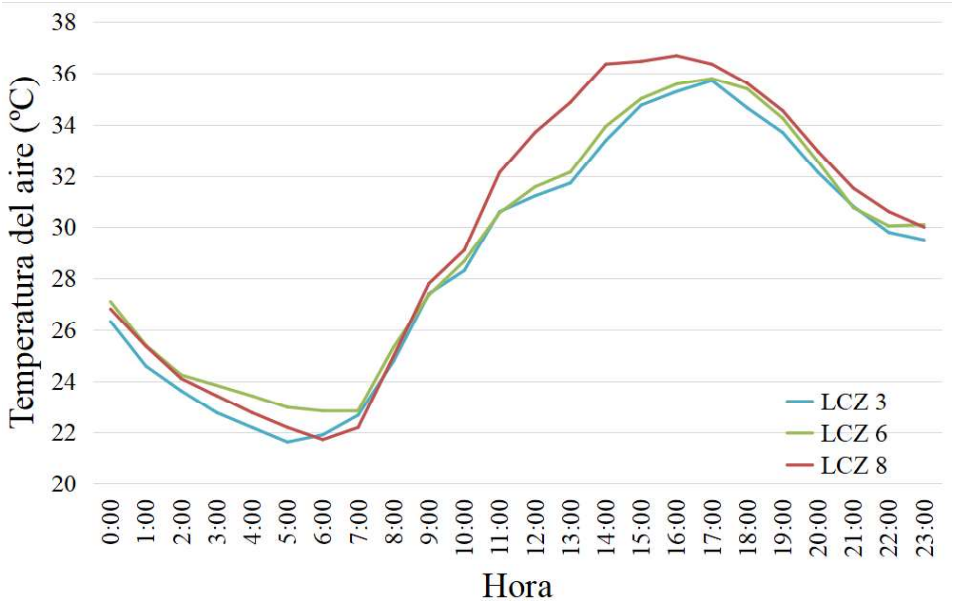


Figura 2. Comportamiento térmico medido el día 23/12/2018.

La Tabla IV muestra la diferencia de temperatura entre los comportamientos monitoreados y los estimados utilizando la herramienta de pre-diseño DTair. Esto representa el grado de ajuste. Los resultados muestran que en todos los casos la diferencia térmica predictiva es menor a 1ºC. En la LCZ 3 la diferencia está sobreestimada (+0,3ºC) y en los casos 6 y 8 está subestimada (-0,2 y -0,8ºC). Teniendo en cuenta que la precisión de los registradores de datos utilizados es de ±0,7 °C, estos resultados predictivos resultaron ser confiables.

Tabla IV. Ajuste de la herramienta DTair.

	Monitoreado	**Estimado**	**Diferencia**
LCZ 3	35.7ºC	36.0ºC	+0.3ºC
LCZ 6	35.8ºC	35.5ºC	-0.2ºC
LCZ 8	36.7ºC	35.8ºC	-0.8ºC

Escenarios urbanos propuestos

Con el fin de utilizar las herramientas de pre-diseño para elaborar recomendaciones de planificación y así lograr una rehabilitación térmica del AMM, se probaron un conjunto de doce escenarios urbanos. Cada uno de los escenarios urbanos respeta los rangos de validez de las herramientas (Ruiz et al, 2017) y los valores de las propiedades morfológicas y de cobertura superficial para cada LCZ representativo (Stewart and Oke,

2012). En la Tabla V se muestran las variables utilizadas. Es importante aclarar que algunas variables son fijas y otras presentan un rango de valores.

Las variables fijas son cinco: UCW, T/m, HA, DTwall, NT y SP. Para los valores de MBH hay tres opciones que varían entre 3 a 15 m dependiendo de las cantidades de pisos (referencia de pisos de 3 m de altura), y los valores de SVF varían según las variables involucradas en cada indicador.

Tabla V. Valores de las variables en los escenarios urbanos.

Variable	Valor
Altura media de la edificación - MBH (m)	3 - 9 - 15
Ancho del canal vial - UCW (m)	20
Cantidad de árboles por metro - T/m *	0.24
Albedo horizontal - HA	0.38 - 0.54
Temperatura superficial diurna de las paredes - Dtwall (ºC)	38
Factor de visión de cielo - SVF	Entre 0.48 a 0.86
Número de árboles - NT (u)	0 - 25
Permeabilidad solar - SP *Morus alba*	0.314

**árboles de 2º magnitud implantados a 8 m de distancia en una calle de 100 m de longitud.*

En la Figura 3 se presenta la DTair y el Tcomfort estimados para cada escenario.



MBH (m)	3	9	15	3	9	15	3	9	15	3	9	15
UCW (m)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
T/m (u)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0	0	0	0	0	0
HA (u)	0.38	0.38	0.38	0.54	0.54	0.54	0.38	0.38	0.38	0.54	0.54	0.54
DTwall (ºC)	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0
SVF (u)	0.62	0.54	0.48	0.62	0.54	0.48	0.86	0.67	0.52	0.86	0.67	0.52
NT (u)	25	25	25	25	25	25	0	0	0	0	0	0
SP *Morus alba* (u)	0.314	0.314	0.314	0.314	0.314	0.314	0	0	0	0	0	0
DTair (ºC)	32.9	32.6	32.3	31.8	31.5	31.2	34.4	34.1	33.8	33.3	33.0	32.7
Tcomfort (W/m2)	371	346	327	371	346	327	572	512	465	572	512	465
LCZ	8	6	3	8	6	3	8	6	3	8	6	3

Figura 3. Comportamiento térmico diurno (DTair) y confort (Tcomfort) de los doce escenarios urbanos.

Los resultados en términos de DTair muestran que:

- Los escenarios más frescos son los forestados, alcanzando diferencias dentro de éste conjunto de 1.7ºC, entre el caso más fresco (31.2ºC - MBH 15m, LCZ 3) y el más cálido (32.9ºC - MBH 3m, LCZ 8).
- Los escenarios más cálidos son los no forestados, alcanzando diferencias dentro de éste conjunto de 1.7ºC, entre el caso más fresco (32.7ºC - MBH 15m, LCZ 3) y el más cálido (34.4ºC - MBH 3m, LCZ 8).
- Al comparar los casos forestados y no forestados a igualdad de todas las variables consideradas, la diferencia alcanza 1.5°C, siendo más frescos los escenarios forestados.

- Al comparar la variación de los valores de albedo de los materiales horizontales, manteniendo constantes todas las demás variables, se alcanzan diferencias de 1.1°C, siendo más frescos los escenarios de mayor albedo.
- La mayor diferencia entre el escenario más fresco y el más cálido alcanza los 3.2ºC.

Los resultados en términos de Tcomfort muestran que:

- Ningún escenario alcanza el rango donde la gente prefiere no cambiar de estado.
- Existen diferencias de hasta 245 W/m^2 entre los escenarios forestados y los no forestados.
- El LCZ 3 demuestra ser el escenario donde la gente siente menos calor, y el LCZ 8 donde la gente siente más calor.

Estrategias de rehabilitación térmica y de confort exterior para las LCZ analizadas

La Figura 4 muestra el área potencial de rehabilitación del AMM -LCZ 3, 6 y 8-. En cuanto a las estrategias de rehabilitación urbana podemos encontrar que:

- Es recomendable mantener la forestación de alineación en las calles, las diferencias térmicas alcanzan los 1.5ºC a iguales condiciones de LCZ.
- A menor altura de edificación las temperaturas diurnas aumentan.
- A mayor valor de albedo de los materiales horizontales, la temperatura del aire se mantiene más fresca, existen diferencias de hasta 1.1ºC a iguales condiciones de LCZ.
- Atendiendo a un equilibrio que posibilite un adecuado enfriamiento radiativo nocturno y la suficiente protección al acceso solar para mejorar condiciones de confort, es necesaria una adecuada relación entre ancho del canal vial, altura de edificación y distancia de plantación del arbolado de alineación, que garantice valores de SVF menores a 0.50.

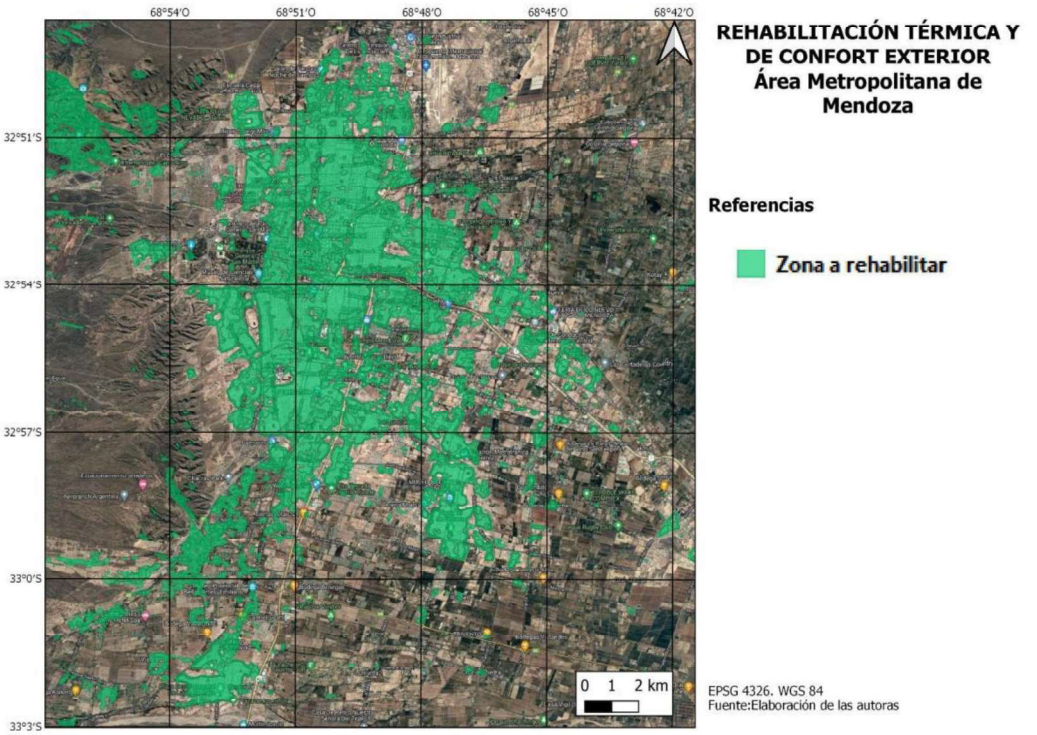


Figura 4. Áreas potenciales de rehabilitación térmica y de confort exterior del AMM.

CONCLUSIONES

Este trabajo analiza las posibilidades de rehabilitación térmica y de confort exterior diurno en el área urbana del AMM, mediante la aplicación de dos herramientas de pre-diseño de fácil aplicación (DTair y Tcomfort). Se analizaron un conjunto total de doce escenarios, cuatro para cada LCZ analizada -"LCZ 6 - Abierto de baja altura" (27,5 %), "LCZ 8 - Grandes construcciones bajas" (22,7 %) y "LCZ 3 - Compacto de baja altura" (21,4%). Cabe destacar que las LCZ analizadas representan el 71.6% del total de la superficie urbana susceptible de rehabilitación, por lo que lo resultados ponen en relevancia el impacto del manejo del arbolado en alineación y la selección de los materiales de las envolventes de pavimentos y veredas, como estrategia para la mitigación del calentamiento urbano en los meses de verano en una ciudad árida.

Entre las estrategias de mejora que contienen las dos herramientas de pre-diseño —forestación, materialidad, morfología— se pudo validar que cada variable tiene un potencial que contribuye a mejorar las condiciones de habitabilidad exterior. Siendo para el caso de la forestación mantener el esquema regular de implantación y homogéneo de especie, para el caso de la materialidad aumentar los valores de los albedos horizontales, y para el caso de la morfología mantener una proporción adecuada entre ancho de calle y altura de las edificaciones e intervalo de plantación de forestales en alineación que sea conducente a obtener valores de SVF iguales o cercanos a 0.50.

Los resultados obtenidos demuestran que aplicar herramientas de pre-diseño en las etapas de planificación permite diagnosticar de forma temprana como impactan las decisiones de diseño del espacio, a fin de mejorar su desempeño térmico y contribuir a su sostenibilidad desde el punto de vista energético y ambiental.

REFERENCIAS

Brown, R. D. and Gillespie, T. J. *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency*, John Wiley & Sons Inc, New York, 1995.

Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., … Theeuwes, N. (2018). WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(9), 1907–1924. (2018). DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0236.1

Colli, M. F., Correa, E. N. y Martinez, C. F. Aplicación del método WUDAPT en la ciudad de Mendoza-Argentina para definir Zonas Climáticas Locales. *Urbano* 42: p. 18-31. (2020).

Mandelmilch, M., Michal, F., Noa, M. and Oded, P. Urban Spatial Patterns and Heat Exposure in the Mediterranean City of Tel Aviv. *Atmosphere* 11, 963 (2020).

Oke, T. *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. IOM Report No. 81, WMO/TD No. 1250, WMO, Geneva, 2004.

Picone, N. Comparación de imágenes satelitales Sentinel 2 y Landsat 8 en el estudio de áreas urbanas. *VI Congreso Nacional de Geografía de Universidades Nacionales*. Resistencia, Chaco, Argentina. (2017).

Ruiz, M. A. and Correa Cantaloube, E. N. Adaptive model for outdoor thermal comfort assessment in an Oasis city of arid climate. *Build. Environ.* 85, 40–51 (2015). DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.018

Ruiz, M. A., Sosa, M. B., Correa Cantaloube, E. N. and Cantón, M. A. Suitable configurations for forested urban canyons to mitigate the UHI in the city of Mendoza, Argentina. *Urban Clim.* 14, 197–212 (2015). DOI: 10.1016/j.uclim.2015.05.005

Ruiz, M. A., Sosa, M. B., Correa Cantaloube, E. N. and Cantón, M. A. Design tool to improve daytime thermal comfort and nighttime cooling of urban canyons. *Landsc. Urban Plan.* 167, 249–256 (2017). DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.07.002

Stewart, I.D. and Oke, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. *B. Am. Meteorol. Soc.* 92, 1879–1900 (2012). DOI: 10.1175/bams-d-11-00019.1

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MENSUAL EN BUENOS AIRES

Maria Luz Veniard, Candela Sartor, Daniel Perez y Gabriela Lakkis

Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Pontificia Universidad Católica Argentina, Buenos Aires, ARGENTINA

e-mail: candelasartor@uca.edu.ar

RESUMEN

La radiación solar es uno de los factores más importantes que afectan al clima y al medio ambiente. Su variación a lo largo del tiempo es clave para la cuantificación de los impactos del cambio climático. Dado el limitado número de estaciones meteorológicas que proveen series temporales de largo plazo de observaciones de radiación, a lo largo del tiempo se ha desarrollado una amplia gama de métodos de estimación, basados principalmente en diferentes variables meteorológicas. Sin embargo, aún son escasos los que consideran el impacto de la calidad del aire. En este trabajo se analizaron y compararon más de 50 modelos empíricos para la estimación de radiación media mensual, a partir de datos meteorológicos diarios del Servicio Meteorológico Nacional para la Ciudad de Buenos Aires. Las variables utilizadas incluyeron temperatura, horas de luz y humedad relativa para el período 2015-2021. Ya que las partículas de contaminación del aire pueden reducir la transparencia atmosférica y afectar a la radiación solar total que llega al suelo, también se incluyeron en el análisis, índices de calidad de aire construidos a partir de las concentraciones de PM10, NOx y CO obtenidas de la red de monitoreo local. Los resultados preliminares, evaluados por medio de indicadores estadísticos como el coeficiente de regresión, error cuadrático medio y error porcentual, mostraron que la inclusión de contaminantes no mejora significativamente el desempeño de los modelos, siendo los basados en temperatura los que mejor ajustan el comportamiento de la radiación observada.

Palabras clave: Modelos de estimación, Radiación Solar, Índice de calidad de aire, Contaminantes, Buenos Aires.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar se define como la cantidad de energía irradiada del sol en forma de ondas electromagnéticas que llega a la superficie terrestre y es la fuente principal de energía de la Tierra que actúa como motor en la mayoría de los procesos naturales e hidrológicos (Jahani et al., 2017). Muchos fenómenos naturales de la Tierra están causados principalmente por la diferencia, transformación y transporte de la energía de la radiación solar. El conocimiento de la cantidad de radiación solar incidente es de gran importancia para muchos campos de investigación, como la estimación de la evapotranspiración de referencia, crecimiento de cultivos, fuentes renovables de energía, así como para detectar cambios en la composición de la atmósfera y evaluar escenarios de cambio climático y calentamiento global (Chuan et al., 2020). Sin embargo y a pesar de su creciente relevancia, los datos de radiación solar aún son medidos con poca frecuencia en muchas regiones y en algunos casos sólo se dispone de series espacio–temporales incompletas o insuficientes. Para cubrir esta vacancia de información, en las últimas décadas se han ido desarrollando y perfeccionando técnicas alternativas para estimar la radiación solar con diferente grado de complejidad, entre las que se pueden

mencionar el análisis con métodos de interpolación (Soltani et al; 2004), procesos estocásticos multivariantes (Hansen; 1999), métodos basados en satélites, estimación a partir de datos sustituidos de estaciones cercanas (Nonhebel, 1993), así como modelos empíricos de estimación. Estos últimos son los más ampliamente difundidos y pueden estar basados en diferentes factores y variables. La radiación solar es función de múltiples parámetros meteorológicos como la evaporación, los efectos de la nubosidad, la humedad relativa, las precipitaciones, la temperatura, la duración de la insolación, la radiación solar extraterrestre y la reflexión del entorno. Adicionalmente depende de parámetros geográficos como la latitud, la longitud y la altitud del lugar y factores geométricos como la inclinación y los ángulos de orientación de los receptores solares, así como de parámetros astronómicos como la constante solar, la distancia Tierra-Sol, la declinación solar y el ángulo horario (Besharatet al., 2013).

Con la creciente y sostenida industrialización, el aumento de transporte y emisiones a la atmósfera, en el contexto de cambio climático y calentamiento global, el problema de la contaminación atmosférica ha cobrado mayor importancia. Parámetros físicos como la dispersión de las moléculas de aire, el contenido de vapor de agua y otros componentes atmosféricos como O2, N2, CO2 y O y la contaminación en general, pueden modificar la cantidad de radiación solar total que llega a la superficie del suelo (Streets et al; 2006). Además, las partículas en suspensión, capaces de dispersar y absorber la radiación, pueden debilitar la radiación solar del suelo. Existen en la literatura varios análisis que han confirmado descensos de la radiación solar superficial en diversos lugares geográficos en lo que se denominó "oscurecimiento global", entre los años 50 y la década de 1980 (Stanhill and Cohen, 2001). A partir de los 80 sin embargo, muchos estudios utilizando registros de radiación solar actualizados encontraron una inversión de esta tendencia y la denominaron "abrillantamiento" (Wind et al., 2005). Aparentemente ambos fenómenos están relacionados con la alteración antropogénica de la carga de aerosoles y contaminantes en la atmósfera (Alpert et al., 2005). Elminir (2007) concluyó que la contaminación atmosférica reducía la radiación total del suelo en Egipto en un 9,3-22% en condiciones de cielo despejado, mientras que Fu y Dan (2018) señalaron que el aumento de la concentración de aerosoles atmosféricos afectaba significativamente al número de horas de sol. Es por ello que investigaciones recientes enfocadas a evaluar el comportamiento de la radiación solar incidente, han incorporado a los métodos de estimación este impacto de la polución en el aire a través de diversos índices de calidad del aire y utilizando modelos empíricos lineales, exponenciales y logarítmicos concluyeron que la inclusión de la contaminación atmosférica puede mejorar la precisión de predicción de los modelos (Zhao et al. 2013; Suthar et al. 2017). Sin embargo, estos estudios aún son escasos, en particular en el hemisferio sur. En Argentina si bien existen en la literatura trabajos enfocados en radiación solar incidente (Gallegos y Lopardo, 1988; Podestá et al., 2004 y Carmona et al., 2018 entre otros) hasta el momento son casi nulos los trabajos que consideran el impacto de la calidad del aire.

El propósito del presente trabajo es evaluar diversos modelos de estimación de la radiación solar incidente en Buenos a partir de datos meteorológicos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional , y de radiación solar de la base de datos de AERONET, para el período enero de 2015 hasta abril de 2021, incluyendo los índices de calidad de aire API y AQI que construidos a partir de concentraciones de los principales polutantes de la ciudad provistos por el Gobierno de la Cuidad Autónoma de Buenos Aires a través de su red de monitoreo ambiental.

METODOLOGÍA

Datos

El estudio se centró en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. La radiación solar mensual (Rs) utilizada para evaluar la performance de los modelos de estimación empelados (de ahora en más medida u observada) se obtuvo a partir de los valores diarios en MJ/m^{-2}/día de la red Solar Radiation Network (SolRad-Net), Level 1.5 de la estación CEILAP-BA (34.5°S, 58.5° O; ASM: 26.0 m) para el período enero de 2015 hasta abril de 2021. La red SolRad-Net es una red establecida de sensores terrestres que proporciona mediciones de flujo solar de alta frecuencia en tiempo casi real. Esta red se implementó como complemento de la red Aerosol Robotic Network (AERONET) y su instrumentación está situada en los emplazamientos de AERONET. El equipo utilizado por la red cuenta con un piranómetro Kipp and Zonen CM-21 (305-2800 nm) para medir el espectro solar total y un sensor de energía PAR (radiación fotosintéticamente activa) Skye Instruments SKE-510 (rango espectral: 400-700 nm). En 2001, los sensores PAR se sustituyeron por un piranómetro CM-21 filtrado con filtro RG695 que transmite la luz con una longitud de onda superior a 695 nm, por lo que el valor determinado restando esta medida del piranómetro sin filtrar representa la irradiancia UV + PAR (305-695 nm). Los sensores de flujo registran la irradiancia instantánea a intervalos de 2 minutos. Los detalles completos pueden ser obtenidos en https://solrad-net.gsfc.nasa.gov/system_info_additional.html. En cada método de estimación se utilizaron para el cálculo de los valores medios mensuales, los datos diarios de temperatura (°C), precipitación (mm) y humedad relativa provistos Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Los datos de acceso público y gratuito sobre la calidad del aire que comprenden información sobre los contaminantes presentes en la ciudad se obtuvieron de la estación de monitoreo atmosférico situada en Parque Centenario a través de la plataforma https://buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/ control-ambiental/laboratorio-ambiental/calidad-de-aire. Los datos comprenden información de valores diarios, mensuales y máximos para diferentes períodos de tiempo de medición. En este trabajo se emplearon valores mensuales de los contaminantes PM_{10}, CO y NO_x para los períodos mencionados en la Tabla I.

Modelos empíricos de estimación

De acuerdo Angstrom (1924), los parámetros de entrada más influyentes para predecir la radiación solar global son las horas de sol diarias reales n, las horas de sol potenciales diarias N, la radiación solar extraterrestre diaria extraterrestre R_0, la temperatura mínima, máxima y media diaria, así como la humedad relativa. En este estudio se evaluaron un total de 19 modelos de estimación que emplearon como variables de entrada la temperatura, horas de sol, humedad relativa, precipitación y altura, así como diversas combinaciones de ellas. Para el caso del modelo propuesto por Angstrom Prescott (AP), se incluyeron las expresiones tanto lineales, cuadráticas como exponenciales (Angstrom, 1924). Adicionalmente, se incorporó la influencia de la calidad de aire a través de los índices de calidad de aire establecidos de acuerdo a los criterios de la Central Pollution Control Board (CPCB) de la Republica de India y el de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) (En adelante llamados AQI CPCB y AQI EPA respectivamente). La incorporación de estos índices a las expresiones matemáticas de los modelos, se hizo principalmente como variaciones de AP, siguiendo los lineamientos propuestos por Sun et al. (2016), Suthar et al. (2017) entre otros y considerando también en estos casos las expresiones lineales, exponenciales y logarítmicas. En términos generales, un índice de calidad del aire se define como un esquema global que transforma los valores ponderados de los distintos contaminantes en

un único número o conjunto de números (Ott, 1978) que determina la calidad de aire de la región. La diferencia entre ellos radica básicamente en la cantidad de contaminantes considerados, el período de concentración incluido en el cálculo y finalmente en las categorías dentro de las cuales se clasifica la calidad de aire obtenida. La información completa de cómo está desarrollado el AQI CPCB puede ser encontrada en https://app.cpcbccr.com/ccr_docs/FINAL-REPORT_AQI_.pdf, pero brevemente el índice calcula la calidad de aire a partir de la concentración en micro-gm/m^3 de los PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, NO_x, O_3 y NH_3, pudiendo devolver un valor estimativo a partir de sólo tres contaminantes (PM_{10} o $PM_{2.5}$ son requerimiento necesario). Por su parte, el índice AQI EPA calcula la calidad de aire en función de un solo contaminante por vez, siendo los contaminantes considerados los mismos que en el caso anterior, pero evaluando diferentes tiempos promedio de concentración. La información completa puede encontrarse en https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/. En este trabajo se evaluaron los modelos considerando los valores medios mensuales de diversos índices AQI EPA según el contaminante considerado. En adelante los llamaremos AQI EPA PM_{10}, AQI EPA CO, AQI EPA NO_2, dependiendo de las concentraciones de contaminantes empleadas. La Tabla I muestra esquemáticamente esta información.

Tabla I. Contaminantes y concentraciones utilizadas

Contaminante	**AQI India**	**AQI EPA**
PM_{10}	24 hr promedio	24 hr promedio
NO_x	24 hr promedio	-
NO_2	-	1 hr promedio
CO	Máximo de 8 hr	8 hr promedio

En todos los casos, la radiación solar extraterrestre, R_a, se calculó según la expresión

$$R_a = \frac{24\times60}{\pi}\, G_{sc}\, d_r[\omega_s\, sen(\varphi)\, sen(\delta) + \cos(\varphi)\ \ \cos(\delta)\, \sin(\omega_s)] \quad (1)$$

donde G_{sc} es la constante solar constante (0.082 MJ m^{-2} min^{-1}) y d_r es la distancia relativa inversa entre la Tierra y el Sol calculada como:

$$d_r = 1 + 0{,}033\, cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (2)$$

siendo J es el día Juliano. El ángulo de la hora del atardecer ω_s se calculó por medio de:

$$\omega_s = \ arc\, cos[-\tan(\varphi)\, tang(\delta)] \quad (3)$$

donde φ es la latitud y δ es la inclinación solar, en radianes, mientras que φ es un dato que depende del lugar en el que se haga la medición. Por otro lado, δ se calculó a través de la expresión:

$$\delta = 0{,}409\, sen\left[\frac{2\pi}{365}J - 1{,}39\right] \quad (4)$$

El máximo posible de horas de sol se calculó de acuerdo a:

$$N = \frac{24}{\pi}\,\omega_s \quad (5)$$

Indicadores estadísticos

De acuerdo con Yorukoglu y Celik (2006), cuando se pretende evaluar la exactitud de los modelos de estimación, el análisis estadístico debe contemplar la comparación entre la radiación solar incidente medida y la estimada por cada modelo. Para ello, se utilizaron

el error de sesgo promedio (MBE), error de sesgo absoluto promedio (MABE), error porcentual promedio (MPE), error porcentual absoluto promedio (MAPE), error cuadrático promedio (RMSE), coeficiente de correlación cuadrático (R^2). Estos estadísticos se definieron según las expresiones que figuran en la Tabla II.

Tabla II. Estadísticos para la evaluación del rendimiento de los modelos

Error de sesgo promedio (MBE) en MJ m^{-2} $día^{-1}$: $$MBE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(Obsi - Modi)$$	(6)
Error de sesgo absoluto promedio (MABE) en MJ m^{-2} $día^{-1}$: $$MABE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\lvert Obs_i - Mod_i\rvert)$$	(7)
Error porcentual promedio (MPE) en %: $$MPE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\frac{Obs_i - Mod_i}{Obs_i})100\%$$	(8)
Error porcentual absoluto promedio (MAPE) en %: $$MAPE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\left\lvert\frac{Obs_i - Mod_i}{Obs_i}\right\rvert\right)$$	(9)
Error cuadrático promedio (RMSE) en MJ m-2 $día^{-1}$: $$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(Obs_i - Mod_i)^2}{m}}$$	(10)
Coeficiente de Correlación cuadrático (R^2): $$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{m}(\left(\underline{Mod_i} - \underline{Mod}\right)\left(\underline{Obs_i} - \underline{Obs}\right)\right)^2}{\sum_{i=1}^{m}\left(\underline{Mod_i} - \underline{Mod}\right)^2 \ \sum_{i=1}^{m}\left(\underline{Obs_i} - \underline{Obs}\right)^2}$$	(11)

donde Obs_i corresponde al promedio mensual de los valores medidos de R_s en el mes i y Mod_i es el promedio mensual de los valores calculados R_s. La Tabla III y IV muestran los modelos empleados con sus correspondientes expresiones matemáticas, las variables de entrada y la nomenclatura utilizada.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Tabla III. Modelos de estimación empleados

Modelos empíricos de estimación (Denominación abreviada); *Fuente*	**Expresión matemática**	**Variables de entrada**
Angström–Prescott lineal (AP-L) *Angstrom, 1924*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b(\frac{n}{N})$	Rs, Ra
Angström–Prescott cuadrático (AP-C) *Angstrom, 1924*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b(\frac{n}{N}) + c\,(\frac{n}{N})^2$	N, n
Hargreaves and Samani (HS) *Hargreaves and Samani, 1982*	$\frac{\mathrm{R_s}}{\mathrm{R_a}} = \frac{\mathrm{a}}{\mathrm{R_a}} + \mathrm{b}\ \mathrm{T_d^{0,5}}$	Td
Bristow and Campbell (BC) *Bristow KL, Campbell, 1984*	$\frac{R_s}{R_a} = a\,(1 - e^{-b\,(T_{max}-T_{min})^c})$	Tmax, Tmin
Annandale (A) *Annandale et al., 2002*	$\frac{R_s}{R_a} = a\,(1 + 2{,}7 \times 10^{-5} Z) T_d^{0,5}$	Z
Richardson (R) *Richardson,1981*	$\frac{R_s}{R_a} = a\,T_d^b$	T
Ojosu and Komolafe modificado (OK) *Ojosu and Komolafe, 1987*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\frac{T_{min}}{T_{max}} \times \frac{H_r}{100}$	Tmax, Tmin, Hr
Wu (Wu) *Wu et al., 2007*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\,T_d^{0,5} + cT_p + dP'$	Tp, P'
Glower and McCulloch (GMcC) Glower and McCulloch, 1958	$\frac{R_s}{R_a} = a\,cos(\varphi) + b(\frac{n}{N})$	φ
Ogelman (Og) *Ogelman et a., 1984*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\,(\frac{n}{N})^2$	n, N
Angström–Prescott lineal con AQI (AP-L-AQI) *Zao et al; 2013*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\left(\frac{AQI}{100}\right) + d\left(\frac{n}{N}\right)\left(\frac{AQI}{100}\right)$	N, n, AQI
Angström–Prescott exponencial con AQI (AP-exp-AQI) *Zao et al; 2013*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\,exp\left(\frac{AQI}{100}\right) + d\left(\frac{n}{N}\right) exp\left(\frac{AQI}{100}\right)$	N, n, AQI
Angström–Prescott logaritmica con AQI (AP-log-AQI) *Zao et al; 2013*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\,log\left(\frac{AQI}{100}\right) + d\left(\frac{n}{N}\right) log\left(\frac{AQI}{100}\right)$	N, n, AQI
Angström–Prescott lineal 2 con AQI (AP-L2-AQI) *Zao et al; 2013*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\frac{n}{N} + c\frac{AQI}{100}$	N, n, AQI
Angström–Prescott exponencial 2 con AQI (AP-exp2-AQI); *Zao et al; 2013*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\,exp\left(\frac{AQI}{100}\right)$	N, n, AQI
Angström–Prescott exponencial cuadrática con AQI (AP-exp-cuadr-AQI) *Zao et al; 2013*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\left(\frac{n}{N}\right) + c\left(\frac{n}{N}\right)^2 + d\,exp\left(\frac{AQI}{100}\right)$	N, n, AQI
Angström–Prescott con latitud y longitud y AQI (AP-coord-AQI) *Zao et al; 2013*	$\frac{R_s}{R_a} = a + b\frac{n}{N} + c\varphi_1 + d\,\varphi_2 + e\frac{AQI}{100}$	$AQI, n, N, \varphi_{1,\varphi_2}$

Tabla IV. Nomenclatura

R_s	Radiación solar incidente (MJ m^{-2} d^{-1})	n	Horas de sol
R_a	Radiación solar extraterrestre (MJ m^{-2} d^{-1})	N	Máximo de horas de sol
φ_1 y φ_2	Latitud y longitud	AQI	Air Quality Index
T_{min}	Temperatura mínima (ºC)	T_p	$(T_{max}+T_{min})/2$ (ºC)

 ISBN: 978-987-1323-89-0

T_{max}	Temperatura máxima (ºC)	T_d	T_{max}-T_{min} (ºC)
T	Temperatura media (°C)	H_r	Humedad relativa (%)
P'	Día lluvioso (si/no)	Z	Altura sobre el nivel del mar (m)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la inclusión de los valores de los índices AQI EPA y AQI CPCB, se obtuvieron un total de 47 combinaciones de los 17 modelos de estimación originales. El rendimiento de estas estimaciones fue evaluado comparando los valores estimados de cada modelo propuesto y los valores de radiación medidos, teniendo en cuenta los valores de los estadísticos de la Tabla II. Los modelos de mayor precisión en la estimación son los que tienen los índices RMSE, MBE, MABE y MPE más cercanos cero y un coeficiente de correlación más aproximado a 1. Los resultados de cada indicador estadístico y sus correspondientes rangos de variación se muestran en la Tabla V. Del análisis estadístico surge que cerca del 20% de los modelos muestran muy buen ajuste entre la radiación global media mensual y los demás parámetros meteorológicos, con un valor de $R^2 \geq 0.95$. Estos valores están son comparables con estudios hechos en diferentes puntos geográficos. Por ejemplo, Álvarez et al. (2011) analizando modelos de predicción de radiación solar en Chile, encontró que los mejores ajustes correspondían a los modelos de BC y HS con coeficientes de regresión entre 0.86 y 0.9. Del 20% de los modelos encontrados en este trabajo con buen ajuste, los dos con valores más cercanos a cero en los otros indicadores estadísticos corresponden a ***Wu y HS***, modelos basados en temperatura exclusivamente. En términos generales la inclusión de la calidad de aire no parece mejorar significativamente los resultados, y los modelos que mejor predicen la radiación solar, son los que consideran el índice AQI CPCB. Sin embargo y a excepción del ***AP-exp-cuadr***, (R^2= 0.97 y MBE, MABE, MPE y MAPE cercanos a cero), el resto muestra una leve tendencia a subestimar los valores predichos y muestran una mayor dispersión que el resto del conjunto. En la Tabla VI y la Figura 1, se muestra la selección de las mejores estimaciones considerando todos los indicadores estadísticos.

Tabla V. Rango de valores obtenidos para los estadísticos considerando todos los modelos

R^2	0.74; - 0.97
MBE	-52,66; - 22.76
MABE	0.96; 52.66
MPE	-3.14; 1.15
MAPE	0.06; 3.14
RMSE	8.32; 446.41

Tabla VI. Modelos con mejores valores de estadísticos

Modelo	**RMSE**	**MBE**	**MABE**	**MPE**	**MAPE**	**R^2**
HS	***9.87***	***0.01***	***1.14***	***-0.01***	***0,07***	***0.95***
A	23.92	-2.69	2.76	-0.19	0,20	0.95
Wu	***8.32***	***0.23***	***0.96***	***0.01***	***0,06***	***0.97***
AP-L-AQI CPCB	28,64	-3,37	3,37	-0,25	0,24	0,95
AP-exp-AQI CPCB	14,04	-1,06	1,65	-0,09	0,11	0,95
AP-log-AQI CPCB	20,94	-2,44	2,47	-0,18	0,18	0,95
AP-exp-cuadr-AQI CPCB	***11,23***	***0,33***	***1,32***	***0,02***	***0,09***	***0,95***
AP-coord-AQI CPCB	12,84	-1,23	1,51	-0,01	0,11	0,95

 ISBN: 978-987-1323-89-0

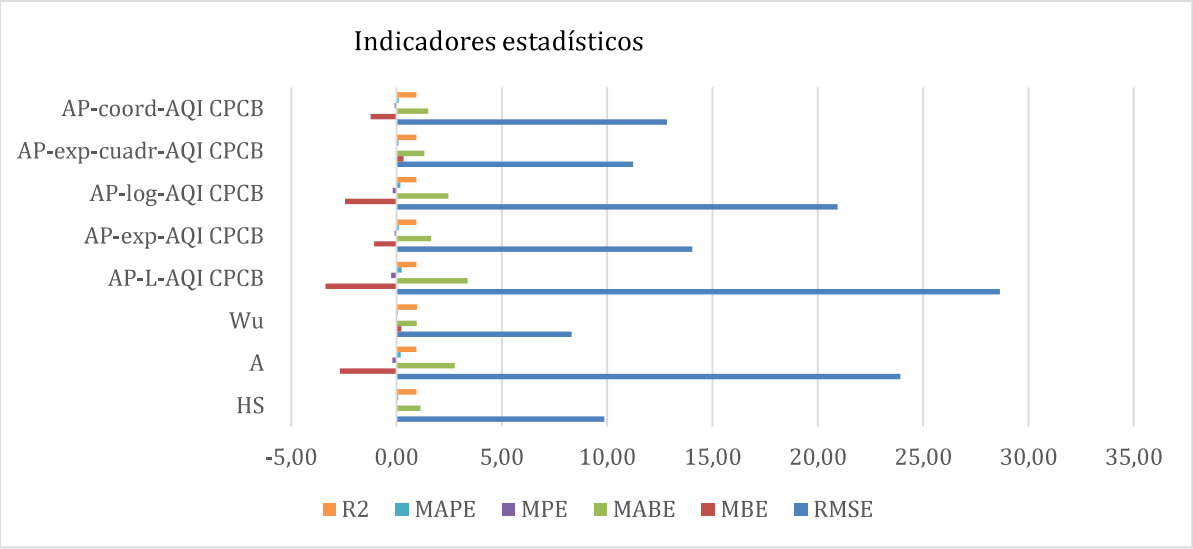
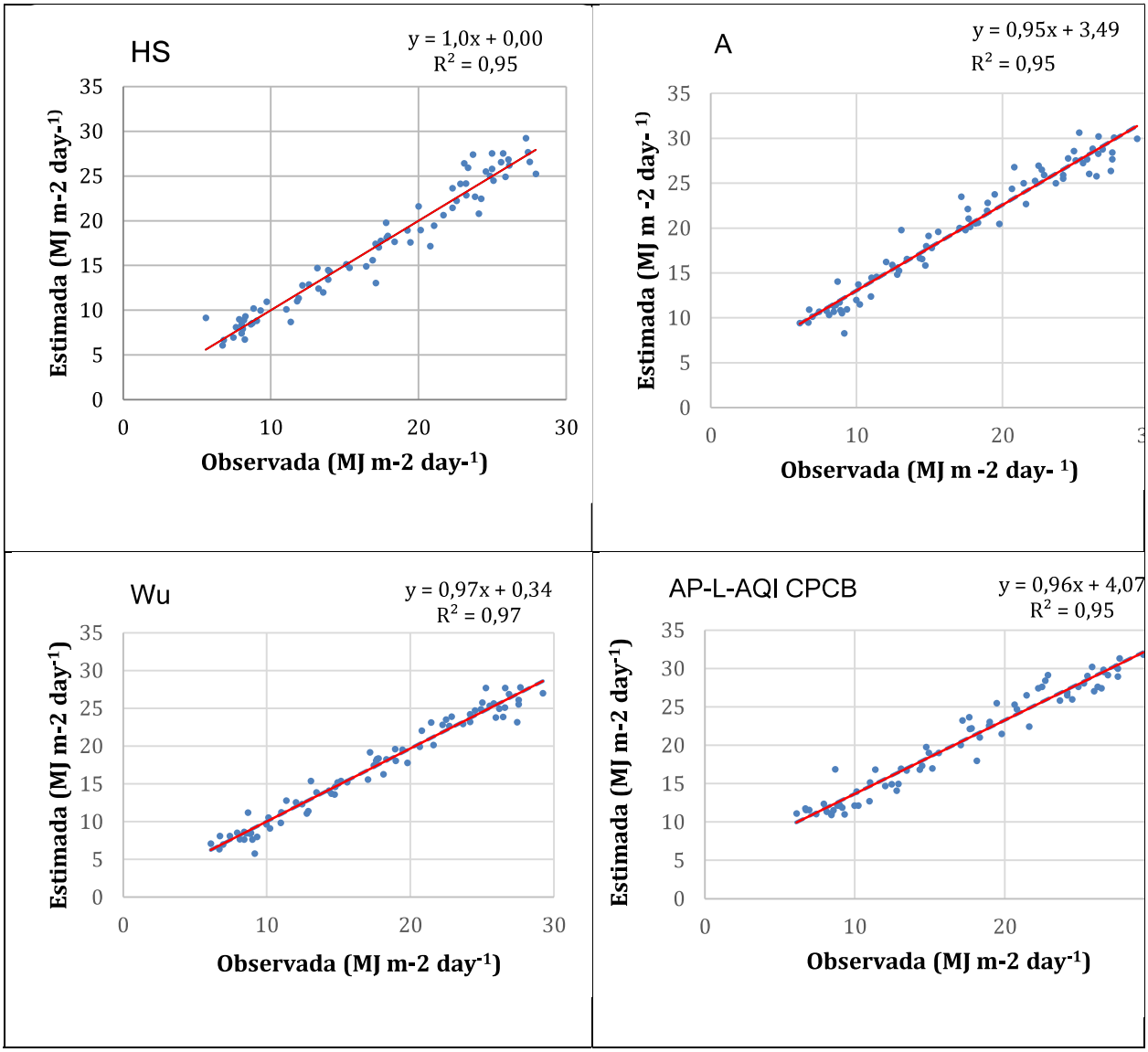


Figura 1. Indicadores estadísticos para los modelos con mejor desempeño



 ISBN: 978-987-1323-89-0

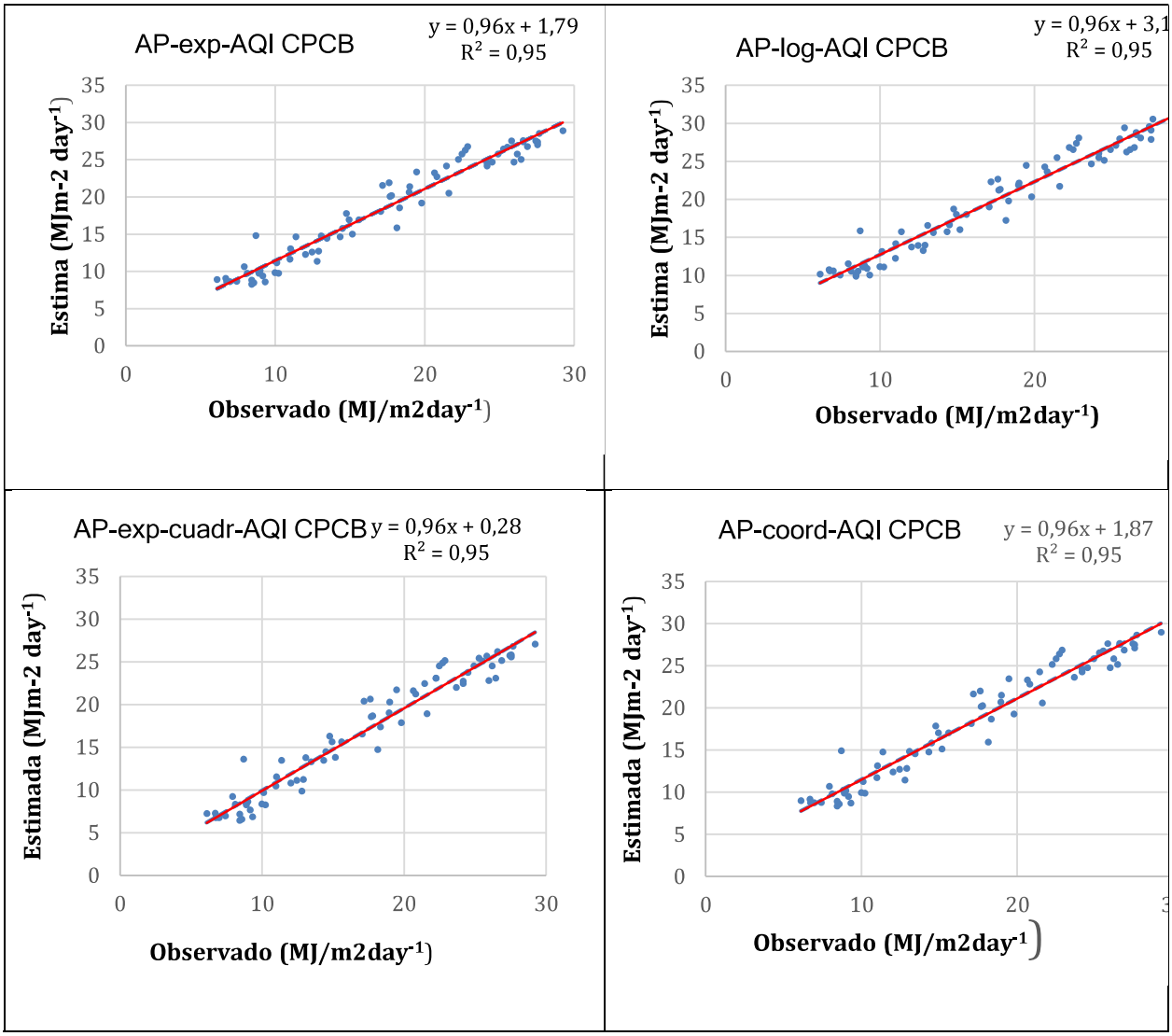


Figura 2. Gráficos con los ajustes entre radiación solar estimada por los modelos y la observada. Nótese que en cada caso figuran los valores de los coeficientes de regresión a y b

La Figura 2 muestra las regresiones entre la radiación estimada a través de cada modelo propuesto y la radiación solar observada para los modelos de la Tabla VI, incluyendo los valores numéricos de los coeficientes de la ecuación de regresión.

CONCLUSIONES

La radiación solar y su interacción con la atmósfera son el motor principal del tiempo y el clima. Por ello, comprender la radiación solar en todo el planeta es crucial para entender el sistema climático y los cambios que está experimentando. Dadas las diversas dificultades que se encuentran a la hora de medir la radiación solar, se han desarrollado una amplia gama de métodos para estimar la radiación en diferentes lugares, lo que dificulta la elección del más adecuado para un lugar concreto. En este sentido, se testearon un total de 17 métodos para estimar la radiación solar global media mensual en Buenos Aires para el período 2015-2021. Comparando con los modelos y evaluando los valores de los indicadores estadísticos empleados, se observa que los modelos basados exclusivamente en temperatura ofrecen una mejor estimación. En particular los modelos de Wu y Hargreaves y Samani. Los modelos basados en horas de luz son en general los que mostraron un peor desempeño, pero si se incluye en ellos la influencia de calidad de

aire a través del índice AQI, mejoran sustancialmente su estimación; aun así, no proporcionan valores estimados más acertados que los basados en temperatura.

REFERENCIAS

Angstrom A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. Q J R Meteorol Soc. (1924) 50:121–6. doi: 10.1002/qj.49705021008

Alpert P, Kishcha P, Kaufman YJ, Schwarzbard R. Global dimming or local dimming effect of urbanization on sunlight availability. Geophys Res Lett 2005; 32:L17802. http://dx.doi.org/10.1029/ 2005GL023320.

Alvarez J., Mitasova H., Allen, HL., Estimating solar radiation in southern central chile. Chilean Journal of Agricultural Research, (2011); 71, 601-9.

Babak Jahani, Y. Dinpashoh, Atefeh Raisi Nafchi, Evaluation and development of empirical models for estimating daily solar radiation, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 73, 2017, 878-891, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.124.

Besharat Fariba, Ali A. Dehgan, Ahmad R. Faghih, Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study," ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviwes 21 (2013) 798-821.

Bristow KL, Campbell GS, On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. Agricultural and Forest Meteorology 1984; 31:59–166.

Chuan He, Jiandong Liu, Fang Xu, Teng Zhang, Shang Chen, Zhe Sun, Wenhui Zheng, Runhong Wang, Liang He, Hao Feng, Qiang Yu, Jianqiang He, Improving solar radiation estimation in China based on regional optimal combination of meteorological factors with machine learning methods, Energy Conversion and Management, Volume 220, 2020, ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113111.

Facundo Carmona, P. Facundo Orte, Raúl Rivas, Elian Wolfram, Eduardo Kruse, Development and Analysis of a New Solar Radiation Atlas for Argentina from Ground-Based Measurements and CERES_SYN1deg data, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, Volume 21, Issue 3, 2018, 211-217, ISSN 1110-9823, https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.003.

Elminir HKR. Relative influence of weather conditions and air pollutants on solar radiation Part 2: modification of solar radiation over urban and rural sites. Meteor Atmos Phys. (2007) 96:257–64. doi: 10.1007/s00703-006-0210-y

Fu CB, Dan L. Influence of intensified air pollution on the sunny diffuse radiation fraction in China. Chin Sci Bull. (2018) 63:2655– 65. doi: 10.1360/N972018-00177

Glower J, McCulloch JSG. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 1958;84:172.

Grossi Gallegos, H., Roque Lopardo, Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the Argentine Pampa Humeda, Solar Energy, 40, Issue 5, 1988, 397-404, ISSN 0038-092X, https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90094-1.

Hansen JW. (1999). Stochastic daily solar irradiance for biological modeling applications. Agricultural and Forest Meteorology 94 (1): 53-63.

Hargreaves GH, Samani ZA. Estimating potential evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 1982;108(IR3):223–30.

Nonhebel S. 1993. The importance of weather data in crop growth simulation models and assessment of climatic change effects. Ph.D. thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands

Podestá, Guillermo P.; Liliana Núñez, Carlos A. Villanueva, María A. Skansi, Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 123, Issues 1–2, 2004, 41-53, ISSN 0168-1923, https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.11.002.

Ogelman H, Ecevit A, Tasdemiroglu E. A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. Solar Energy 1984;33:619–25

Ojosu JO, Komolafe LK. Models for estimating solar radiation availability in south western Nigeria. Nigerian Journal of Solar Energy 1987; 6:69–77.
Ott, W.R. (1978) Environmental indices theory and practice.AnnArborScience Publishers Inc., Ann Arbor, Mich. 48106.
Richardson, C. W., 1981: Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water Resour. Res., 17, 182–190.
Streets DG, Wu Y, Chin M. Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. Geophys Res Lett. (2006) 33:2006GL026471. doi: 10.1029/2006GL026471
Soltani A, Meinke H, de Voil P. 2004. Assessing linear interpolation to generate daily radiation and temperature data for use in crop simulations. European Journal of Agronomy 21 (2) :133-148.
Stanhill, G. and Cohen S., Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences, Agricultural and Forest Meteorology, 107 (4), 2001, 255-278, ISSN 0168-1923,
Sun H., Gui D., Yan B., Liu Y., Liao W., Zhu Y., Lu C., Zhao N. Assessing the potential of random forest method for estimating solar radiation using air pollution index Energy Convers. Manage., 119 (2016), pp. 121-129
Suthar M, Singh GK, Saini RP. Effects of air pollution for estimating global solar radiation in India. Int J Sustain Energy. (2017) 36:20– 7. doi: 10.1080/14786451.2014.979348
Wild M, Gilgen A, Roesch A, Ohmura CN, Long EG, Dutton B, et al. From dimming to brightening, decadal changes in solar radiation at Earth's surface. Science 2005;308(5723):847–50. [29]
Yorukoglu, M., & Celik, A.N. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. Energy Conversion and Management, 47, 2441-2450.
Zhao N, Zeng X, Han S. Solar radiation estimation using sunshine hour and air pollution index in China. Energy Convers Manag. (2013) 76:846– 51. doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.037

CARACTERIZACIÓN DE FRACTURAS DE ROCAS BASALTICAS A PARTIR DE LA DETECCIÓN DE EMISIÓN ACÚSTICA

Alejandra Vesga-Ramírez [ab], M. Eduardo Zitto [c], Dino Filipussi [ad], Emilio Camilion [e], Rosa Piotrkowski [cf], Martín Gómez [ab]

[a] *Grupo de Ondas Elásticas, ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA*
[b] *Grupo de Emisión Acústica, FRD, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA*
[c] *Departamento de Matemática, FIUBA, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA*
[d] *Departamento de Física, ECyT-UNSAM, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA*
[e] *YPF-Tecnología, La Plata, ARGENTINA*
[f] *ITECA UNSAM-CONICET, Centro de Matemática Aplicada, ECyT-UNSAM, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA*

e-mail: alejandravesga@cnea.gov.ar

RESUMEN

Las rocas circundantes de macizos rocosos bajo tensión tales como túneles en montañas, paredes de roca en pozos de perforación petrolera o en volcanes están generalmente sometidas a diferentes condiciones de esfuerzos, entre estos de compresión. Por tanto, estudiar las propiedades de rotura de las rocas bajo diferentes condiciones de esfuerzos es de gran importancia para comprender los mecanismos de fractura y realizar predicciones de fallos en rocas sometidas a compresión. La detección de Emisión Acústica (EA) es un método de ensayo no destructivo (END) que sirve para comprender y estudiar las ondas acústicas que se generan cuando un material está sometido a una solicitación. Detectar esta EA es una herramienta para entender las discontinuidades presentes en un material, así como la base para determinar áreas potenciales de inestabilidad como efecto de la activación y/o reactivación de fracturas/fallas, propagación de fracturas y nucleación de microfracturas. Este trabajo presenta los resultados de la adquisición de las señales recibidas de EA en un ensayo de compresión uniaxial de una roca tipo Basalto, proveniente del volcán Peteroa en Argentina. La roca se sometió a diferentes estados de tensión hasta llegar a la rotura. Se analizaron los eventos de EA registrados, por medio de los parámetros clásicos de Emisión Acústica más representativos para evaluar el proceso de fractura de la roca. También se usaron parámetros secundarios de la EA para realizar una clasificación de los modos de fractura, indicando en qué situaciones predominaban el modo tensil o el de corte para los diferentes estados de tensión a lo largo del ensayo.

Palabras Clave: Emisión Acústica, Basalto, Peteroa, Fractura Tensil, Fractura Corte.

INTRODUCCIÓN

La Emisión Acústica (EA) es un fenómeno ampliamente estudiado que ocurre cuando un material libera energía en forma de ondas elásticas en respuesta a una solicitación (Ono,2011; Calabrese,2020; Cassals,2021). Estas ondas, generadas por una fuente de EA pueden ser atribuidas a formación de microfracturas, reactivación de fracturas, la propagación de fracturas entre otras (Carrasco,2021; Zhao, 2022; Li, 2022; Niu,2023) Diversas investigaciones utilizando la EA han permitido un mayor entendimiento de los

procesos de formación, crecimiento y predicción de daños en una variedad de materiales y rocas (Rodríguez,2019; Zhang,2021; Dong,2023, Cao,2023)

Asimismo, los avances en el estudio de la EA han llevado a la aplicación de esta técnica en áreas de investigación adicionales. Recientemente, se ha empleado la detección de EA para analizar fracturas inducidas por cambios en la presión del fluido en los poros y la inyección de fluidos (Wu; 2022; Shi,2023) Estos hallazgos han ampliado las posibilidades de la EA y han proporcionado nuevos conocimientos sobre la respuesta de los materiales ante diferentes estímulos.

En este contexto, el presente estudio se propone investigar las características mecánicas y las propiedades de la Emisión Acústica (EA) en ensayos de compresión de rocas, bajo condiciones variables de carga. El conocimiento obtenido a partir de esta investigación contribuirá a una mejor comprensión de los mecanismos de fractura y a la predicción de fallas en rocas sometidas a compresión. Este conocimiento resulta especialmente relevante en áreas donde las rocas circundantes a estructuras geológicas y geotécnicas críticas, como túneles en montañas, paredes de pozos petroleros o volcanes, están sujetas a diferentes condiciones de esfuerzo.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Principio de detección de Emisión Acústica

Para detectar la EA, se utilizan sensores o transductores que se colocan en la superficie del material que se va a inspeccionar. Estos dispositivos están diseñados para capturar las ondas sonoras generadas por el material durante su funcionamiento normal o cuando se somete a cargas o cambios en su estado. Estas ondas son convertidas en señal eléctrica por el sensor, y amplificadas por el preamplificador, llegando a una computadora que las procesará y registrará, ver Fig. 1.

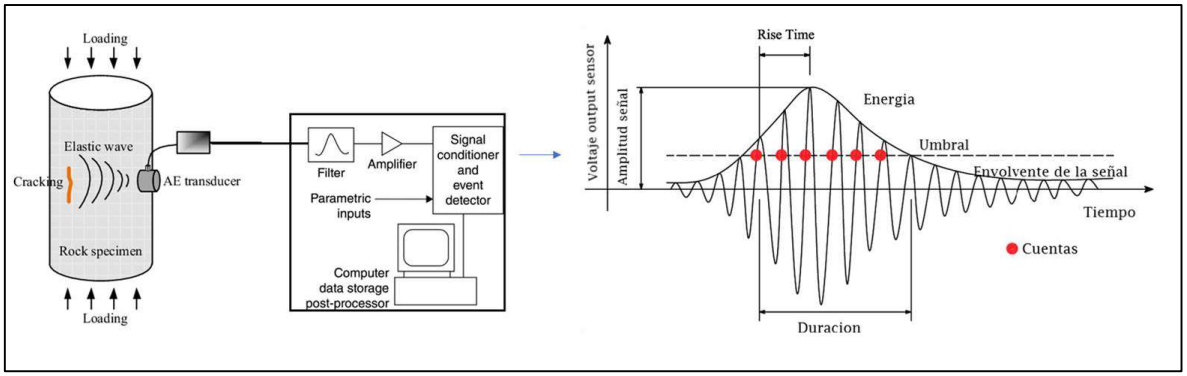


Figura 1. Principio de detección de EA y parámetros típicos de la señal de EA recibida**.**

Entre los parámetros extraídos se encuentran la Amplitud, que indica la magnitud máxima alcanzada por la señal de EA, el Rise Time (RA), que describe la rapidez con la que se alcanza la amplitud máxima desde el inicio del evento, y la frecuencia media (FM), que representa el valor promedio de la frecuencia de las ondas acústicas generadas durante el evento. Así mismo se registra la duración del evento, que indica el intervalo de tiempo durante el cual se detectaron las ondas acústicas, la energía total liberada, cuentas, entre otros.

Clasificación de modos de fractura a partir de EA

 ISBN: 978-987-1323-89-0

La clasificación de los eventos de Emisión Acústica (EA) desempeña un papel crucial en el análisis de este fenómeno. Una técnica comúnmente utilizada para clasificar estos eventos se basa en el gráfico FM vs RA (Jiao,2019; Maji,2021, Wang,2021)

El gráfico FM vs RA es una representación visual que permite evaluar y distinguir diferentes modos de fractura en los eventos de EA. FM a la frecuencia media. RA (Ratio Amplitude por sus siglas en inglés) es una medida que compara las amplitudes de las ondas compresionales y de corte presentes en el evento, ver Fig. 2.

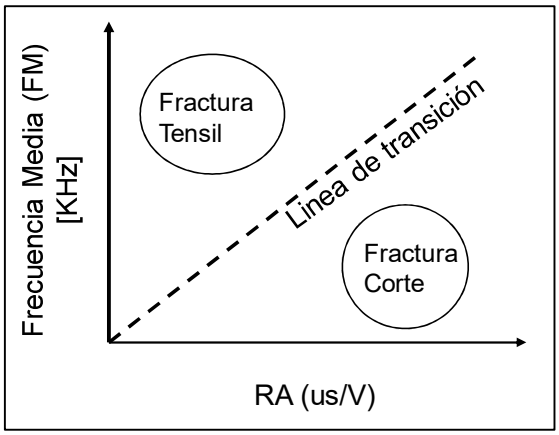


Figura 2. Diagrama esquemático del gráfico de Frecuencia Media (FM) vs RA para discriminar la fractura tipo tensil y corte.

En este gráfico, los eventos de EA se representan como puntos, donde el eje FM representa la relación entre las amplitudes de las ondas compresionales y de corte, mientras que el eje RA indica la amplitud total del evento. Al interpretar la posición de los puntos en el gráfico, es posible clasificar los eventos en diferentes categorías de fractura.

El parámetro Frecuencia Media (FM) se obtiene a partir del cociente entre los parámetros Cuentas/Duración.

$$FM = \frac{Cuentas}{Duración} = unidades\ en\ kHz$$

El parámetro RA se obtiene a partir del cociente entre los parámetros RiseTime/Amplitud

$$RA = \frac{RiseTime\ [us]}{Amplitud\ [V]} = unidades\ en\ us/V$$

Por ejemplo, los eventos ubicados en una región cercana al origen del gráfico, con una relación FM baja y una amplitud total RA relativamente alta, suelen corresponder a eventos de fractura de tipo tensión. Por otro lado, los eventos situados en una región con una relación FM alta y una amplitud total RA moderada, suelen asociarse con eventos de fractura de tipo corte.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

La muestra de basalto fue ensayada a compresión simple uniaxial llevándola a la rotura. Se utilizó un sistema de carga mecánica con capacidad de carga máxima de 440 kN. Los datos de EA registrados en este trabajo fueron adquiridos con un equipo de EA marca PAC de dos canales y se midieron los parámetros de EA durante la carga.

Para la adquisición de las señales de EA se utilizaron dos equipos, uno marca Applied Seismology Consulting con cuatro sensores tipo VS150-M de Vallen System. Su respuesta de frecuencia se caracteriza por un pico a 150 kHz donde exhibe una resonancia. El segundo equipo marca PAC con dos canales fue utilizado para el monitoreo de los parámetros de EA durante la carga. Las señales de EA fueron amplificadas con un amplificador de 40 dB, filtradas por un filtro pasa bajo de 20 kHz y un filtro pasa alto de 1 MHz. Una frecuencia de 5000 muestras por segundo fue usada. El umbral de detección fue fijado en un valor de 42 dB basado en el ruido ambiental. Los parámetros de la señal digital y los datos se almacenaron continuamente en el buffer y luego se transmitieron al ordenador para su posterior procesamiento. El diagrama esquemático y las fotos del equipo del sistema de adquisición se ilustran en la Fig. 3.

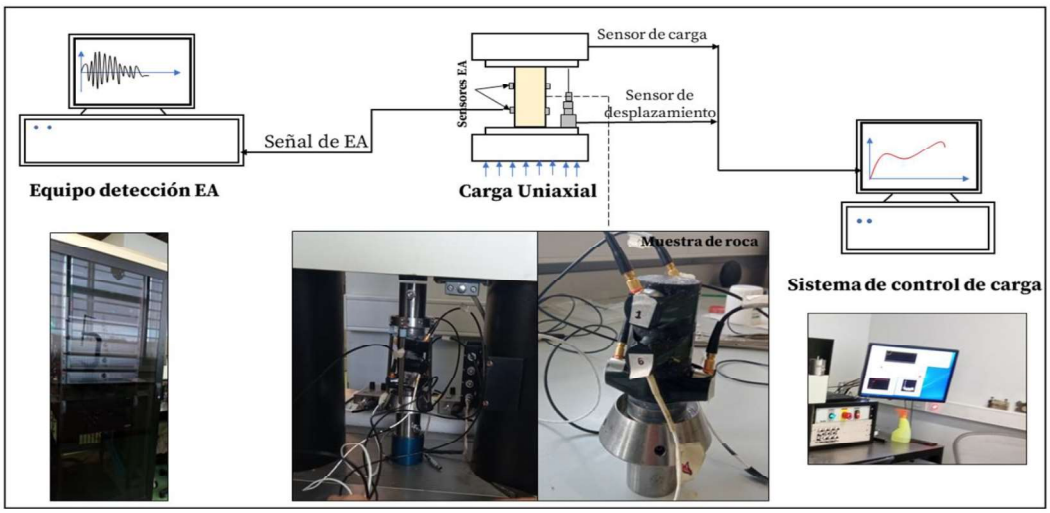


Figura 3. Diseño experimental para la adquisición de señales de Emisión Acústica durante el ensayo de rotura de roca controlado por carga uniaxial

RESULTADOS

Durante el ensayo, se registraron un total de 245.084 señales en los canales 1 y 2. Para facilitar el análisis, se aplicó un filtro de amplitud de 50 dB para identificar los posibles eventos asociados a la Emisión Acústica (EA). Como resultado de este filtro, se identificaron 30.244 hits que se consideraron como eventos potenciales de EA.

A continuación, se presenta el análisis de post-procesamiento en estos eventos para investigar los parámetros más representativos. Estos parámetros fueron seleccionados debido a su capacidad para mostrar variabilidad a medida que la roca se acerca a la etapa de rotura durante el ensayo.

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Amplitud

Este parámetro se refiere al valor máximo valor de amplitud de la señal de EA para cada hit. Se representa en dB. En la figura 3 se observan las amplitudes registradas en cada sensor para cada evento de EA detectado. El momento de la rotura de la probeta o de la propagación inestable de la fisura se da en coincidencia con la máxima fuerza aplicada. Al superponer en el gráfico de la curva de aplicación de la Fuerza sobre la probeta se observa cómo el valor de la amplitud de los hits de EA va aumentando correlacionado con el aumento de la fuerza, y así mismo se observa como disminuye la cantidad de hits registrados de EA cuando la fuerza se mantiene constante, ver Fig. 4.

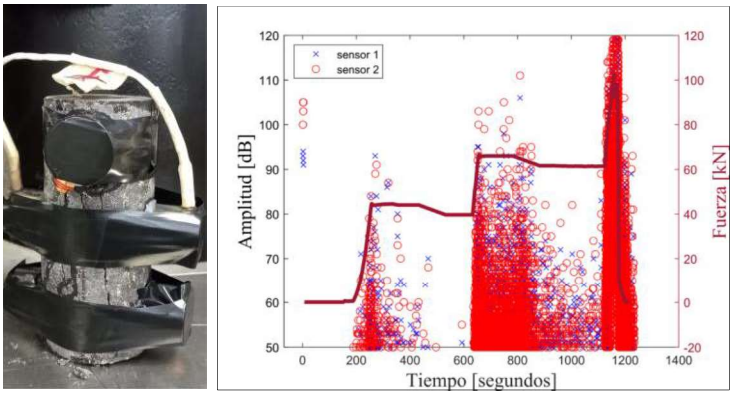


Figura 4. Fuerza aplicada sobre la roca (línea roja) y amplitud de los hits de EA (marcador azul y rojo) registrados en el ensayo en función del tiempo.

Hits acumulados vs Tiempo

El tiempo de ocurrencia (‘hit time’) se refiere al tiempo en el cual se considera que comienza un evento de EA. Esto ocurre cuando la señal de cada hit supera por primera vez el umbral. En la Fig. 5 se muestran los hits acumulados (la suma acumulada de los hits a lo largo del tiempo) de los dos canales de adquisición. Se observa su relación en función de la fuerza aplicada. Los hits acumulados no muestran con tanto detalle los momentos de avance de las fisuras, pero si la forma exponencial creciente de la curva entre los 1000 y los 1100 segundos sería un indicio de un fenómeno de daño incremental sobre el material hasta su fase final entre los 1100 y los 1200 segundos.

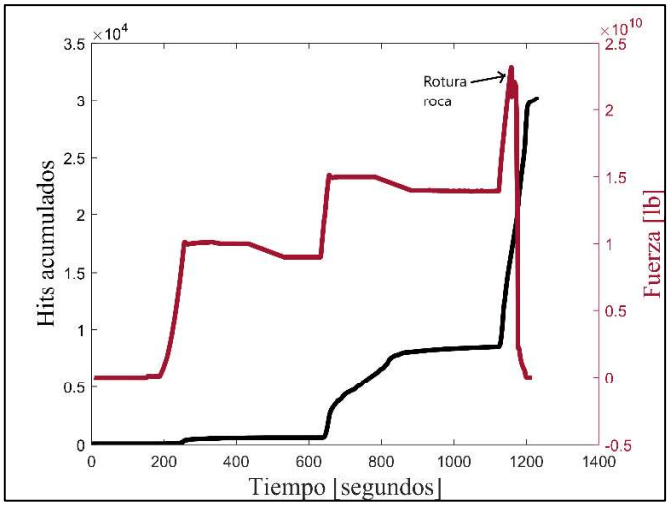


Figura 5. Hits acumulados en función del tiempo

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Cuentas

El parámetro número de cuentas se refiere al número de veces que la amplitud de una señal excede un cierto umbral de voltaje predefinido para cada hit de EA. En la figura 6 de la izquierda se observa el número de cuentas registrados para cada canal de EA en función del tiempo de ensayo. En la Fig. 6 derecha se muestra la cantidad de cuentas acumuladas, superpuesto a la curva de fuerza aplicada durante el ensayo. A partir de aproximadamente los 600 segundos las cuentas acumuladas de EA muestran un incremento en forma de escalones, compatibles, según estudios de EA en la literatura, con la aparición y crecimiento de fisuras dentro de la probeta de roca. Luego aproximadamente a los 1100 segundos donde se produce el mayor salto en las cuentas acumuladas correspondiéndose a la rotura final y coincidente con la máxima fuerza aplicada a la roca.

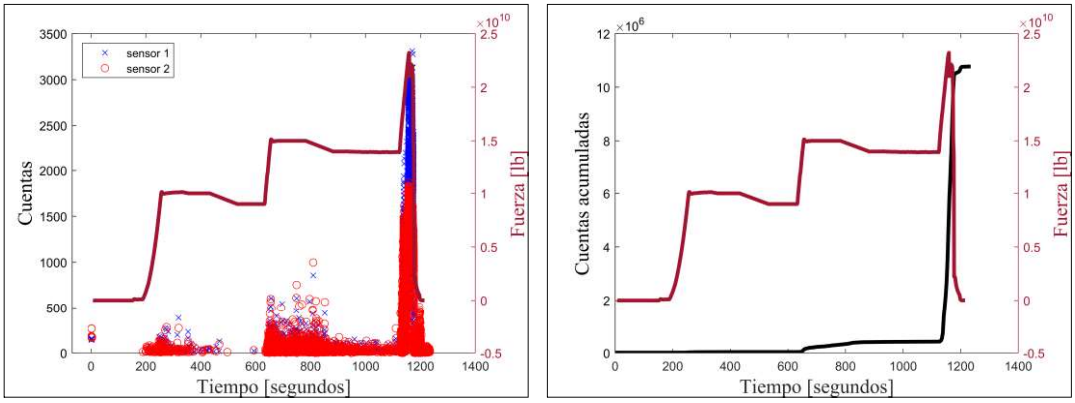


Figura 6. A la izquierda las cuentas registradas por cada sensor en función del tiempo. A la derecha las cuentas acumuladas de los dos sensores. La línea roja representa la curva de fuerza aplicada en el ensayo

Energía

Este parámetro se define como el área bajo la envolvente de la señal de EA. En la Fig.7 se observa como la Energía acumulada aumenta notoriamente al final del ensayo cuando se produce la fractura de la probeta. La Fig. 7 muestra como la Energía acumulada aumenta cerca del límite de la Fuerza máxima aplicada. Se observa también que si bien, en este caso, este parámetro es sensible a los procesos de deterioro gradual, lo es en menor grado que las cuentas acumuladas.

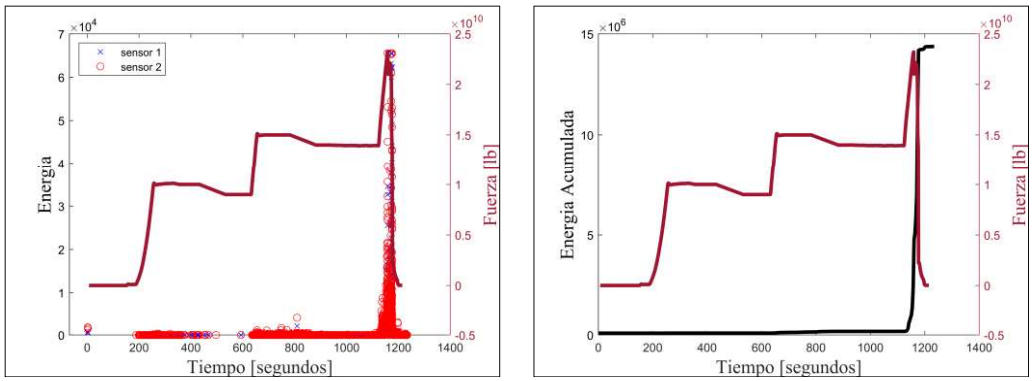


Figura 7. A la izquierda la energía recibida por los dos canales en función del tiempo y a la derecha la energía acumulada por todos los sensores en función del tiempo.

Fractura tipo tensil o corte

A continuación, se presentan los intervalos de tiempo correspondientes a las distintas etapas del ensayo, junto con el análisis respectivo de los resultados obtenidos. Durante cada intervalo, se examinaron las tendencias de los parámetros secundarios RA y FM para determinar los modos de ruptura predominantes (tensil o corte).

Intervalo 1 (155-257 s)-Aumentó la carga

En este intervalo registraron un total de 297 hits, con 120 hits de EA detectados en el canal 1 y 177 hits de EA en el canal 2. En este intervalo la carga aplicada a la muestra de roca basáltica aumenta por primera vez hasta 40 kN. La Fig. 8 ilustra la amplitud máxima de los eventos identificados en el canal 1, así como la clasificación de los hits en términos de modos de fractura tipo tensión o cizalla, basándose en el gráfico FM vs RA. De los 120 eventos registrados en el canal 1, se identificaron 91 como eventos de tipo tensión, mientras que 29 fueron clasificados como eventos de tipo corte.

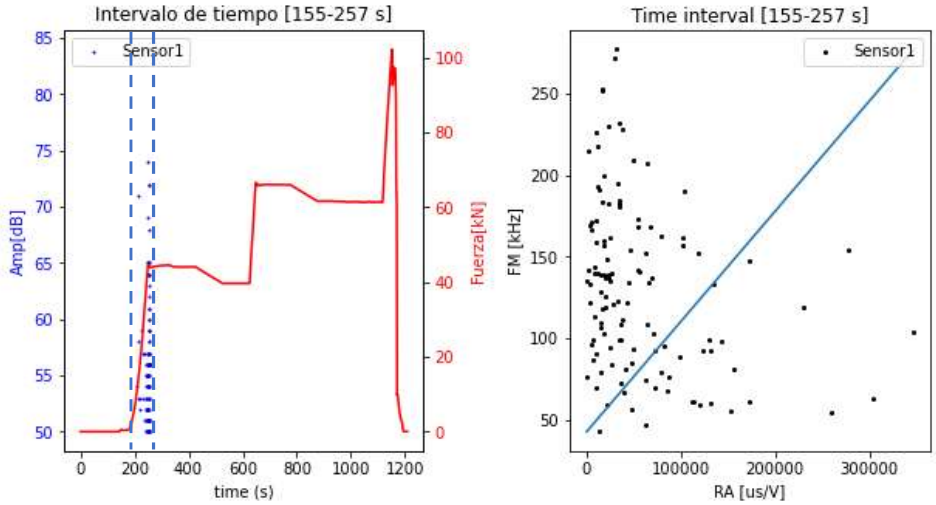


Figura 8. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 155-257 s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

Intervalo 2 (257-633s)-Carga constante y disminuyó

En este intervalo la carga se mantuvo en modo constante y disminuyó en el último tramo. Se registraron un total de 223 hits, con 106 hits de EA detectados en el canal 1 y 177 hits de EA en el canal 2. La Fig. 9 ilustra la amplitud máxima de los eventos identificados en el canal 1, así como la clasificación de los hits en términos de modos de fractura tipo tensión o cizalla, basándose en el gráfico FM vs RA. De los 106 hits registrados en el canal 1, se identificaron 96 como eventos de tipo tensión, mientras que 10 fueron clasificados como eventos de tipo corte.

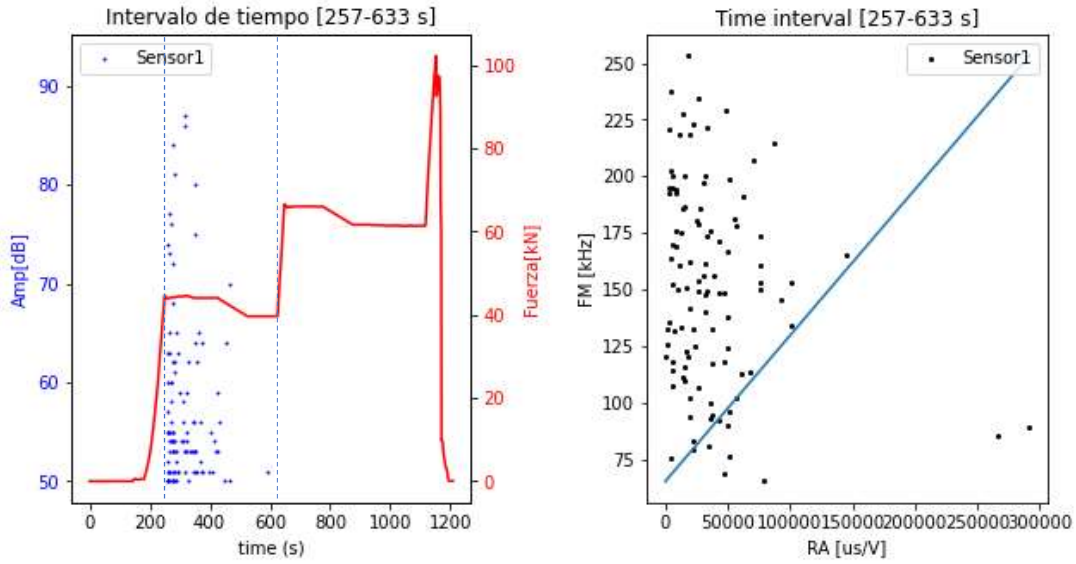


Figura 9. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 257-633 s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

Intervalo3 (633-657s)-Carga aumentó

En este intervalo la carga aplicada a la muestra de roca basáltica aumenta por segunda vez hasta 65 kN Se identificaron 2002 hits entre canal 1 (909 eventos de EA) y canal 2 (1093 eventos de EA). La figura 10 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con modo fractura tipo tensil o cizalla en función del gráfico FM vs RA. De los 909 eventos del canal 1, 742 fueron clasificados tipo tensil y 167 de tipo cizalla.

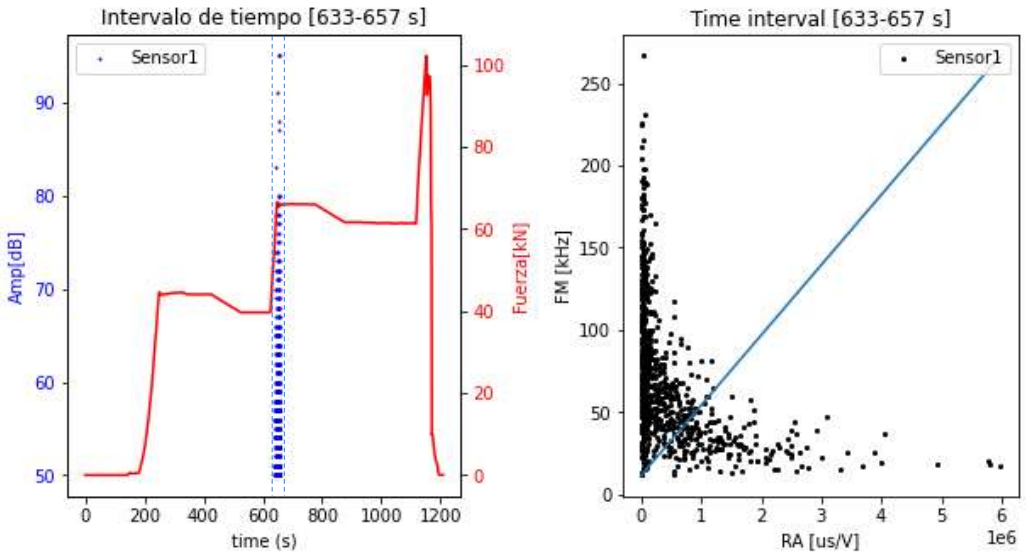


Figura 10. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 633-657s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

 ISBN: 978-987-1323-89-0

Intervalo 4 (657-1122s) --Carga constante-disminuyo

En este intervalo la carga se mantuvo en modo constante, disminuyo y luego volvió a mantenerse constante en el último tramo. Se identificaron 5924 eventos entre canal 1 (2417 eventos de EA) y canal 2 (3507 eventos de EA). La Fig. 11 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados con fractura tipo tensil o cizalla en función del gráfico FM vs RA. De los 2417 eventos del canal 1, 2263 fueron clasificados tipo tensil y 154 de tipo cizalla.

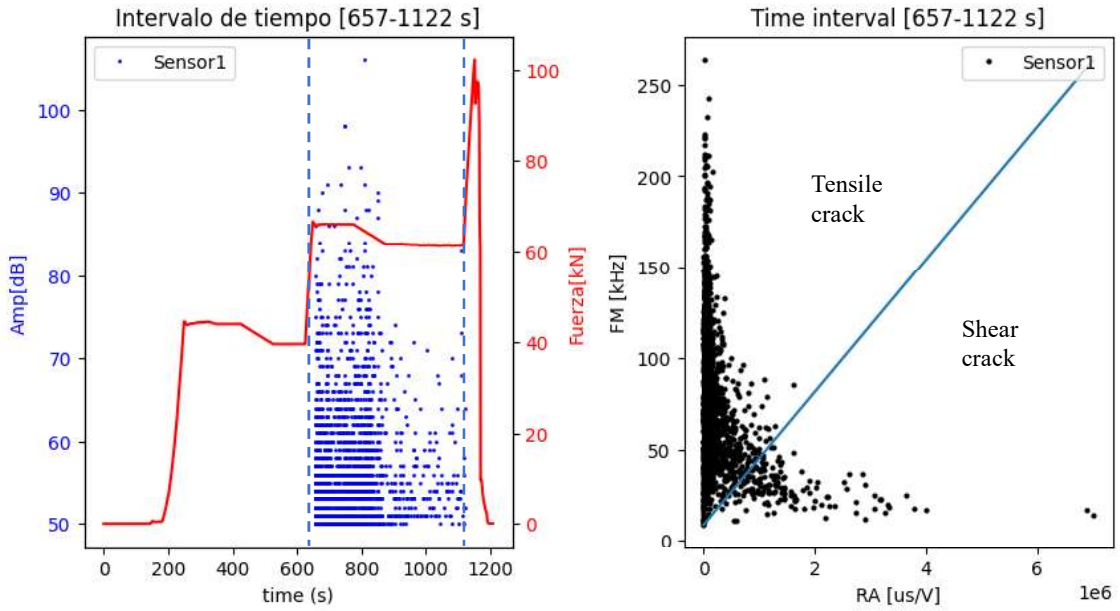


Figura 11. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 657-1122s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte)

Intervalo 5 (1122-1230s)-Carga aumentó

En este intervalo, la carga aplicada a la muestra de roca basáltica aumenta por tercera vez, desde 62 kN hasta 110 kN, momento en el que se produce la rotura de la roca. Se identificaron 21682 eventos entre canal 1(10029 eventos de EA) y canal 2 (11653 eventos de EA). La Fig. 12 muestra la amplitud máxima de los eventos detectados en el canal 1 y los eventos clasificados en tensil o cizalla en función del gráfico FM vs RA. De los 10029 eventos del canal 1, 8595 fueron clasificados tipo tensil y 1434 de tipo corte

 ISBN: 978-987-1323-89-0

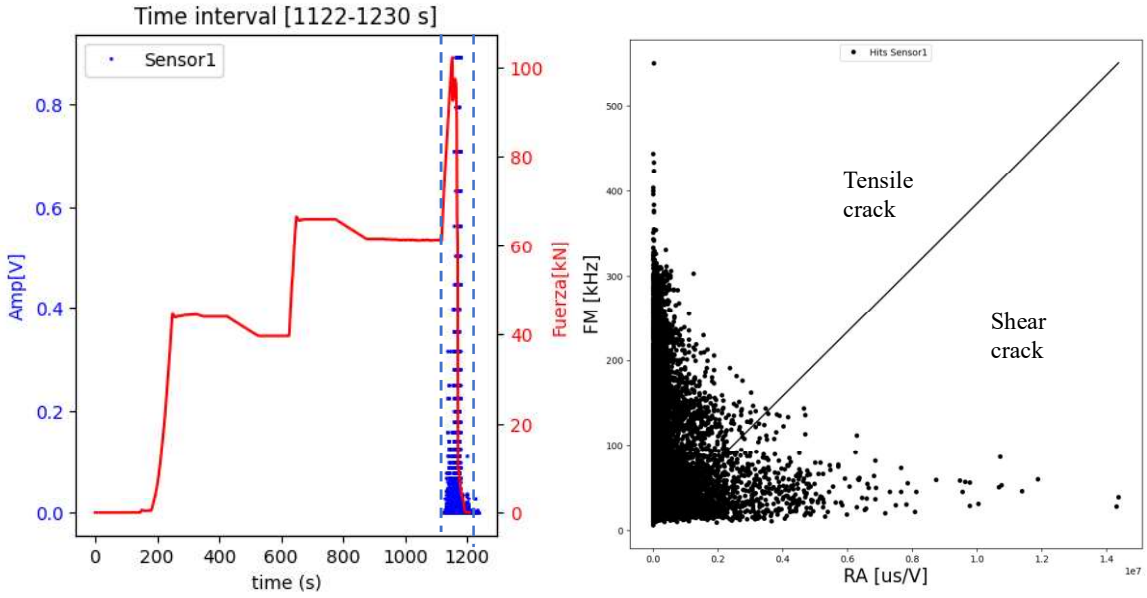


Figura 12. A la izquierda los eventos de EA detectados en el intervalo de tiempo 1122-1230s en función de su amplitud. En rojo se observa la carga aplicada a la roca. A la derecha se observa los parámetros FM vs RA donde se expone los modos de ruptura predominantes (Tensil o Corte).

CONCLUSIONES

Se hizo un ensayo de compresión Uniaxial con roca basáltica hasta llevar a la rotura. Se detectaron las señales de Emisión Acústica, los parámetros más representativos para evaluar el daño fueron la Amplitud, los Hits acumulados, las cuentas y Energía.

Se puede observar un aumento de la tasa de EA a partir de 620 s vinculado a microfisuración roca. Se observa una disminución de la tasa de eventos de EA cuando la fuerza permanece constante. En la etapa final de rotura se observa un aumento de la EA asociada al modo de fractura de corte.

REFERENCIAS

Calabrese, L., & Proverbio, E. (2020). A review on the applications of acoustic emission technique in the study of stress corrosion cracking. *Corrosion and Materials Degradation*, *2*(1), 1-30.

Cao, K., Xu, Y., Khan, N. M., Li, X., Cui, R., Hussain, S., ... & Alarifi, S. S. (2023). A comprehensive model for evaluating infrared radiation and acoustic emission characteristics of sandstone fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, *283*, 109217.

Casals, B., Dahmen, K. A., Gou, B., Rooke, S., & Salje, E. K. (2021). The duration-energy-size enigma for acoustic emission. *Scientific reports*, *11*(1), 5590.

Carrasco, Á., Méndez, F., Leaman, F., & Molina Vicuña, C. (2021). Short review of the use of acoustic emissions for detection and monitoring of cracks. *Acoustics Australia*, *49*, 273-280.

Dong, L., Chen, Y., Sun, D., Zhang, Y., & Deng, S. (2023). Implications for identification of principal stress directions from acoustic emission characteristics of granite under biaxial compression experiments. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *15*(4), 852-863.

Rodríguez, P., & Celestino, T. B. (2019). Application of acoustic emission monitoring and signal analysis to the qualitative and quantitative characterization of the fracturing process in rocks. *Engineering Fracture Mechanics*, *210*, 54-69.

Ono, K. (2011). ACOUSTIC EMISSION IN MATERIALS RESEARCH-A REVIEW. *Journal of acoustic emission*, *29*.

Niu, Y., Hu, Y. J., & Wang, J. G. (2023). Cracking characteristics and damage assessment of filled rocks using acoustic emission technology. *International Journal of Geomechanics*, *23*(4), 04023013.

Li, Q., Qian, Y., Hu, Q., Jiang, Z., Xu, Y., Shang, X., ... & Li, W. (2022). Acoustic Emission Response Mechanism of Hydraulic Fracturing in Different Coal and Rock: A Laboratory Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *55*(8), 4657-4672.

Jiao, Y., Zhang, Y., Zhang, M., Fu, L., & Zhang, L. (2019). Investigation of fracture modes in pervious asphalt under splitting and compression based on acoustic emission monitoring. *Engineering Fracture Mechanics*, *211*, 209-220.

Shi, X., Xu, H., Che, M., Xiao, C., Ni, H., & Gao, Q. (2023). Investigations of fracture behavior and pore structure change in pulse fracturing for cement block. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *166*, 105366.

Wang, T., Wang, L., Xue, F., & Xue, M. (2021). Identification of crack development in granite under triaxial compression based on the acoustic emission signal. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *17*(1), 1550147720986116.

Wu, S., Qin, G., & Cao, J. (2022). Deformation, Failure, and Acoustic Emission Characteristics under Different Lithological Confining Pressures. *Materials*, *15*(12), 4257.

Zhao, S., Chao, Q., Yang, L., Qin, K., & Zuo, J. (2022). A Review on Application of Acoustic Emission in Coal—Analysis Based on CiteSpace Knowledge Network. *Processes*, *10*(11), 2397.

Zhang, Z., Liu, X., Zhang, Y., Qin, X., & Khan, M. (2021). Comparative study on fracture characteristics of coal and rock samples based on acoustic emission technology. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *111*, 102851.



ISBN 978-987-1323-89-0







