

ACTAS DE  
TRABAJOS COMPLETOS  
DEL



**E-ICES 16**

DECIMOSEXTO ENCUENTRO DEL CENTRO  
INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA

ISBN 978-987-1323-86-9

Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA

Actas de Trabajos Completos del E-ICES 16 : Decimosexto Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra / compilación de Martín Pedro Gómez ; Dino Filipussi ; Luis Eduardo Lenzano Andía ; editado por Martín Pedro Gómez ; Dino Filipussi ; Luis Eduardo Lenzano Andía. - 1a ed revisada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2022.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-1323-86-9

1. Geociencias. 2. Ciencias Naturales. I. Gómez, Martín Pedro, comp. II. Filipussi, Dino, comp. III. Lenzano Andía, Luis Eduardo, comp.

CDD 550.7

ISBN 978-987-1323-86-9



9 789871 323869

**ACTAS DE TRABAJOS COMPLETOS**

**DEL**

**E-ICES 16**

**DECIMOSEXTO ENCUENTRO DEL  
CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE  
LA TIERRA**

*Segundo 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, Paula Vildoza, Daniela Guevara Vallese, Nicolás Núñez, Gustavo Álvarez y  
Martín Gómez

Impreso en Argentina - Printed in Argentina

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

ISBN 978-987-1323-86-9

## **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)  
Diego Cowes (ICES CNEA)  
Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)  
Felipe Genovese (UTN FRSR)  
Daniela Guevara Vallese (ICES CNEA)  
Leticia Katzer (CONICET)  
Luis Eduardo Lenzano (ICES-UNCUYO-CONICET)  
María Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)  
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)  
Hernan Xargay (ICES CNEA))

## **COMITÉ CIENTÍFICO**

Dr. Mariano Augusto (UBA-CONICET)  
Dr. Jorge Barón (ICES UNCUYO)  
Dr. Giovanna Cappai (IGAG-CNR, Italia)  
Mag. Ana Rosa Castaño Gañán (ICES CNEA Malargüe)  
Dr. Deyan Draganov (TU DELFT, Holanda)  
Mag. 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)

Dr. Mariano 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. Ing. Guido Ferrari (UTN)  
Dr. Dino Filipussi (ICES CNEA, UNSAM)  
Dr. Martín Gómez (ICES CNEA, UTN, UNSAM)  
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)  
Daniela Guevara Vallese (ICES CNEA)  
María Florencia Lenzano (ICES Regional Mendoza)  
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)

Este Encuentro E-ICES 16 ha recibido un SUBSIDIO PARA REUNIONES PERIODICAS NACIONALES, RC RPN 2020-00031, por parte del MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA a través de la AGENCIA.

# ÍNDICE

<b>MEDICIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA ESTACIÓN DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA GLOBAL USHUAIA</b>	
<i>María Elena Barlasina , Gerardo Carbajal Benítez, Lino Fabián Condori, Helmig Detlev y John Mund</i>	1
<b>DESERTIFICACIÓN EN ARGENTINA: CAMBIOS ESPACIALES DE LA ARIDEZ DURANTE LAS ÚLTIMAS DÉCADAS (2000-2018)</b>	
<i>Pedro S. Blanco y Moira E. Doyle</i>	11
<b>DOS EVENTOS ATÍPICOS DEL AGUJERO DE OZONO SOBRE LA ANTÁRTIDA Y SU IMPACTO EN LA RADIACIÓN UV (2019 Y 2020)</b>	
<i>Gerardo Carbajal Benítez, Héctor R. Estévez Pérez, Héctor Ochoa, y María E. Barlasina</i>	21
<b>PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DEL INTRUSIVO DE TUSHIN, ECUADOR</b>	
<i>Darwin P. Condoy, Christian W. Romero y Milada A. Dvořák</i>	31
<b>TÉCNICAS DE INTERROGACIÓN NEUTRÓNICA PARA DETECCIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS EN CONTENEDORES PORTUARIOS</b>	
<i>Natalia M.B. D'Amico</i>	39
<b>ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA, CÓRDOBA, ARGENTINA</b>	
<i>Lucía de Antueno y Fernanda J. Gaspari</i>	51
<b>COMBINACIÓN DE RECURSOS GEO-TECNOLÓGICOS PARA EL RECONOCIMIENTO Y ANÁLISIS DE CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS EN UN TRAMO DEL RÍO QUINTO</b>	
<i>Daniel A. Dueñas, Graciela del R. Sosa y Francisco Herrera Sánchez</i>	63
<b>PRECIPITACIONES DIARIAS MÁXIMAS Y PERIODOS DE RETORNO PARA LA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE SERIE MÁS LARGA, SAN LUIS. ARGENTINA</b>	
<i>Joaquín Facini y Jorge O. Chiesa</i>	75
<b>SEDIMENTOLOGÍA DEL CUATERNARIO EN EL NOROESTE DE LA SIERRA DE SAN LUIS. SAN LUIS. ARGENTINA</b>	
<i>Joaquín Facini, Jorge O. Chiesa y Sergio Georgieff</i>	80
<b>MODELO DE FALLA SÍSMICA APLICADO A ROTURA DE PROBETAS DE MATERIAL FRÁGIL</b>	
<i>Dino A. Filipussi y Martín P. Gómez</i>	85
<b>APLICACIÓN DE SOFTWARE COMERCIAL PARA DEFINIR EL RIESGO DE LOS METALES PRESENTES EN RESIDUOS MINEROS Y PETROLEROS</b>	
<i>José A. Gálvez, José A. Cantero, Lucas A. Caride, A. Cecilia López, Pablo Salomón y Sergio A. Vardaro.</i>	94



<b>EL MÍNIMO DE MAUNDER EN EL EXTREMO SUR DE AMÉRICA. ALGUNOS “PROXY INDICATORS” EN FUENTES DEL SIGLO XVII</b>	
<i>Margarita Gascón</i>	105
<b>VALORACIÓN DEL ODS661 EN CUENCAS SERRANAS, RIO SAUCE GRANDE BUENOS AIRES, ARGENTINA</b>	
<i>F.J. Gaspari, M.I. Delgado, y L. de Antueno</i>	112
<b>ANÁLISIS DEL RIESGO DE COLAPSO DE VIVIENDAS DE UN SECTOR DE LA CIUDAD DE LA PUNTA, SAN LUIS, ARGENTINA, PREVENCIÓN ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS PREVISTOS PARA LA REGIÓN</b>	
<i>Héctor D. Gómez y Brian L. Muñoz</i>	125
<b>MONITOREO DE ÁREAS AFECTADAS POR UN INCENDIO MEDIANTE TELEDETECCIÓN, EN EL SUDOESTE BONAERENSE</b>	
<i>Adriana Guzmán y Fernanda Gaspari</i>	137
<b>DIGITALIZACIÓN DE PROCESOS, VINCULACIÓN Y EVALUACIÓN EN PRÁCTICAS PROFESIONALES ASISTIDA EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA-UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY-ARGENTINA</b>	
<i>Eduardo Patricio Herrera Oviedo y Julio Tentor</i>	146
<b>COMPLETADO DE DATOS MEDIDOS POR SENSORES DE HUMEDAD DE SUELO: CASO DE ESTUDIO EN ESTACIÓN DE MONITOREO AUTOMÁTICA (EMA) DE LA RED IHREDA</b>	
<i>Christian A. Mancino y Raúl E. Rivas</i>	156
<b>ANÁLISIS TERRITORIAL DE LA CUENCA ALTA DEL RIO RECONQUISTA. UNA VISIÓN INTEGRAL DEL NORESTE BONAERENSE</b>	
<i>V. Mondelo, M.G. Mazzucchelli, V. Peroncini y F.J. Gaspari</i>	164
<b>AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL NA EXTRACÇÃO DO MÁRMORE BRANCO (EMPRESA ROCAFRIK), DA BIBALA. ANGOLA</b>	
<i>Alexis M. Risco, David M. Calenga, Mayda U. Carcassés y Suraymi G. Cruz</i>	176
<b>IMPLICACIONES SOCIO-ANTROPOLÓGICAS DERIVADAS DE LOS DESASTRES NATURALES. CASO VALLE DEL MOCOTIES-TOVAR-VENEZUELA</b>	
<i>Jesús A. Morales</i>	188
<b>PSICOLOGÍA AMBIENTAL. APORTACIONES, ESTRATEGIAS Y PROPÓSITOS ASOCIADOS CON LA ADOPCIÓN DE COMPORTAMIENTOS ECOLÓGICOS</b>	
<i>Jesús A. Morales</i>	196
<b>APROXIMACIÓN A LA VALORACIÓN DEL POTENCIAL MINERO DE DEPÓSITOS DE CALIZAS EN UN SECTOR DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN</b>	
<i>Mariel Negrelli, Gilda Neyra, María J. Méndez, María V. Soria y Mónica S. Ramírez</i>	205

<b>DISCRIMINACIÓN LITOESTRATIGRÁFICA, PETROGRÁFICA Y GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN TARQUI EN EL CORTE CAÑAR - AZOGUES</b>	
<i>Roberto Pulupa, Darío Calderón, Christian Romero, Fausto Carranco, Juan Torres, Ana Gramal, Paola Pazmiño y Daniel Maya</i>	214
<b>ESTUDIO CUALITATIVO DE PAH'S COMO MARCADORES DE INCENDIO EN HUEVOS DE DAPHNIA DEL EMBALSE SAN ROQUE DE CÓRDOBA</b>	
<i>Mario J.A. Ravera, Silvia G. Foray, María F. Mera, Daniel Castellano Santiago Salvano y Gustavo Zitto</i>	224
<b>EL ROL DE LA TEMPERATURA DEL SUELO EN LOS AMBIENTES DE MONTAÑA</b>	
<i>Agustina Reato, Oscar A. Martínez y Eleonora S. Carol</i>	236
<b>ANÁLISIS LITOESTRATIGRÁFICO DE LA UNIDAD YARUQUÍES, ECUADOR</b>	
<i>Christian W. Romero, Darwin P. Condoy, Fausto Carranco y Ana B. Gramal</i>	246
<b>EFFECTO DE LA CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS EXTRA PESADO SOBRE LA COLONIZACIÓN POR LAS MICORRIZAS ARBUSCULARES EN LA RIZÓSFERA PASTO VETIVER</b>	
<i>Jesmary Rosas, Afrodita García-Angarita, Ysvic Inojosa ,Angela De Sisto y Mingrelia España</i>	256
<b>VARIACIÓN ESTACIONAL Y RESPUESTA FRENTE A EVENTOS DE TORMENTA DE LAS PLAYAS DEL PARTIDO DE VILLA GESELL, BUENOS AIRES, ARGENTINA</b>	
<i>Leonardo Sánchez-Caro; Pedro A. Garzo y Germán R. Bértola</i>	266
<b>PREDICCIÓN DE DAM EN MINERAL DE ESCOMBRETA UTILIZANDO DOS MÉTODOS ESTÁTICOS</b>	
<i>Ana A. Senese, Luis Gutierrez, Mariel M. Negrelli , Natalia Hidalgo y Maximiliano Moreno</i>	282
<b>NOVELTY SEARCH APLICADO A SISTEMAS DE PREDICCIÓN DE FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN</b>	
<i>Jan Strappa, Paola Caymes Scutari y Germán Bianchini</i>	292
<b>VARIACIONES DEL FLUJO DE SUBTERRÁNEO PASANTE EN EL SUBÁLVEO DEL RÍO POMÁN (CATAMARCA) Y SU RELACIÓN CON EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL</b>	
<i>Esteban Tálamo, Nora Varela, Gustavo Morales y Federico Díaz Ramos</i>	305
<b>CONSIDERACIONES SEDIMENTARIAS Y PALEOAMBIENTALES DEL ABANICO ALUVIAL DEL RÍO SAN IGNACIO, TUCUMÁN, ARGENTINA</b>	
<i>Mario A. Toledo, Ana Lía Ahumada y Gloria P. Ibañez Palacios</i>	312
<b>ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA ALMACENADA EN GLACIARES Y GLACIARES DE ROCA EN LA CUENCA ALTA DEL ARROYO YAUCHA, MENDOZA</b>	
<i>Bárbara Utesá y Diego Winocur</i>	322

<b>IDENTIFICACIÓN DEL TIEMPO DE ARRIBO DE LA ONDA P PARA EVENTOS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN ROCAS TIPO BASALTO</b>	
<i>Alejandra Vesga-Ramírez, M. Eduardo Zitto, Dino Filipussi, Emilio Camilion, Rosa Piotrkowski y Martín Gómez</i>	333
<b>LOCALIZACIÓN 3D DE EVENTOS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN ROCAS TIPO BASALTO APLICANDO EL ALGORITMO SIMULATED ANNEALING</b>	
<i>Alejandra Vesga-Ramírez, M. Eduardo Zitto, Dino Filipussi, Emilio Camilion, Rosa Piotrkowski y Martín Gómez</i>	348
<b>MONITOR DE CO2 PARA INDICACIÓN Y CONTROL DE VENTILACIÓN EN AMBIENTES CERRADOS PARA PREVENCIÓN DE COVID-19 Y MEJORA EN EL RENDIMIENTO LABORAL</b>	
<i>Juan Vorobioff, Tamara Pintos, Federico Checozzi, Norberto Boggio, Javier Rinaldi, Carlos Rinaldi</i>	364
<b>ANÁLISIS DEL PROCESO DE FALLA DEL HORMIGÓN EMPLEANDO EL MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA Y CRITERIOS DERIVADOS DE LA SISMOLOGÍA</b>	
<i>Hernán Xargay, Marco Pepe y Enzo Martinelli</i>	374
<b>DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS SOBRE LA ACCIÓN DEL FUEGO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO</b>	
<i>Marianela Ripani, Hernán Xargay y Paula Folino</i>	386

# MEDICIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES EN LA ESTACIÓN DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA GLOBAL USHUAIA

María Elena Barlasina <sup>a</sup>, Gerardo Carbajal Benítez <sup>a</sup>, Lino Fabián Condori <sup>a</sup>, Helmig Detlev <sup>b</sup> y John Mund <sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Servicio Meteorológico Nacional, ARGENTINA*

<sup>b</sup>*University of Colorado, Institute of Arctic and Alpine Research. USA*

<sup>c</sup>*National Oceanic and Atmospheric Administrativos (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division. USA*

e-mail: [barlasina@smn.gov.ar](mailto:barlasina@smn.gov.ar)

## RESUMEN

*Los compuestos orgánicos volátiles (COV) agrupan a un número de sustancias químicas, entre las cuales se incluyen los hidrocarburos alifáticos, los aromáticos y los hidrocarburos clorados, aldehídos, cetonas, éteres, ácidos y alcoholes y se emiten a la atmósfera a partir de una amplia variedad de fuentes, tanto naturales como artificiales. Estas sustancias contaminantes no solo causan efectos nocivos en la salud humana por sí mismas, sino también al ambiente, ya que actúan formando aerosoles y como precursores del ozono superficial, al combinarse con los óxidos de nitrógeno (NOx), en presencia de luz solar para formar el smog fotoquímico.*

*En Argentina, el programa de la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) es llevado a cabo por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y coordinado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), propiciando una red global de observaciones e investigación de gases traza incluyendo los COV. En la estación VAG Ushuaia, como parte de esa red, realizaron mediciones in situ en acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division (NOAA) y los resultados se mostrarán en este trabajo.*

Palabras Clave: COV, Muestras, Ushuaia, VAG.

## INTRODUCCIÓN

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son todos aquellos hidrocarburos que a temperatura ambiente son gaseosos o son muy volátiles. Entre los de mayor abundancia en el aire se encuentran el tolueno, n-butano, i-pentano, etano, benceno, n-pentano, propano y etileno. Tienen su origen tanto natural como antropogénico. Los COV de origen natural son emitidos por árboles de hoja perenne y de hoja caduca y presentan un gran potencial para producir ozono troposférico; mientras que los de origen antropogénicos están relacionadas con la evaporación de disolventes orgánicos, la quema de combustibles, al transporte, etc., y entre las principales industrias generadoras de COV antropogénico se cuentan las siderúrgicas, las de la madera, las cosméticas y farmacéuticas y las que tienen procesos en los cuales utilicen pinturas y barnices.

Los COV son muy perjudiciales para la salud del ser humano y el medio ambiente. En primer lugar, algunos COV son destructores del ozono, como el tetracloruro de carbono, que está involucrado en el fenómeno de destrucción de la capa de ozono. Por otra parte, los COV junto con los óxidos de nitrógeno y la luz solar, son precursores del ozono troposférico, produciendo el llamado smog fotoquímico muy perjudicial a la salud humana provocando daños respiratorios y al medioambiente por la oxidación que causa por ejemplo en los cultivos.

Con respecto a daños directos sobre la salud, a corto plazo la exposición a los COV causan daño a las vías respiratorias, irritación de ojos y garganta, etc., mientras que a largo plazo pueden producir daños renales, al hígado o al sistema nervioso central y algunos COV tienen efecto cancerígeno como por ejemplo el benceno.

En vista de la importancia de conocer la presencia de los COV en la atmósfera, es que la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) junto al Global Monitoring Laboratory (GML) llevo adelante un proyecto de monitoreo de gases a nivel mundial, en el cual contemplo el análisis de los COV. Para desarrollar este proyecto de medición y análisis de gases NOAA se valió de la red de estaciones del programa de Vigilancia Atmosférica Global (VAG). El programa VAG coordina estaciones de monitoreo atmosférico globales y regionales, involucrando 80 países y con el objetivo de producir datos de calidad para el estudio y monitoreo del cambio climático y calidad del aire. En nuestro país contamos con estaciones regionales y una estación global ubicada en cercanías de la ciudad de Ushuaia (Tierra del Fuego).

En la estación VAG Ushuaia se llevó a cabo este proyecto de medición desde 2005 hasta 2018 y los resultados obtenidos se expondrán en este trabajo, con el fin de conocer el estado actual de la atmósfera en esta región del planeta, y de esta manera, proporcionar información científica confiable a los encargados de formular políticas ambientales y de salud pública, apoyar las convenciones internacionales y contribuir a mejorar la comprensión de la contaminación atmosférica a largo plazo.

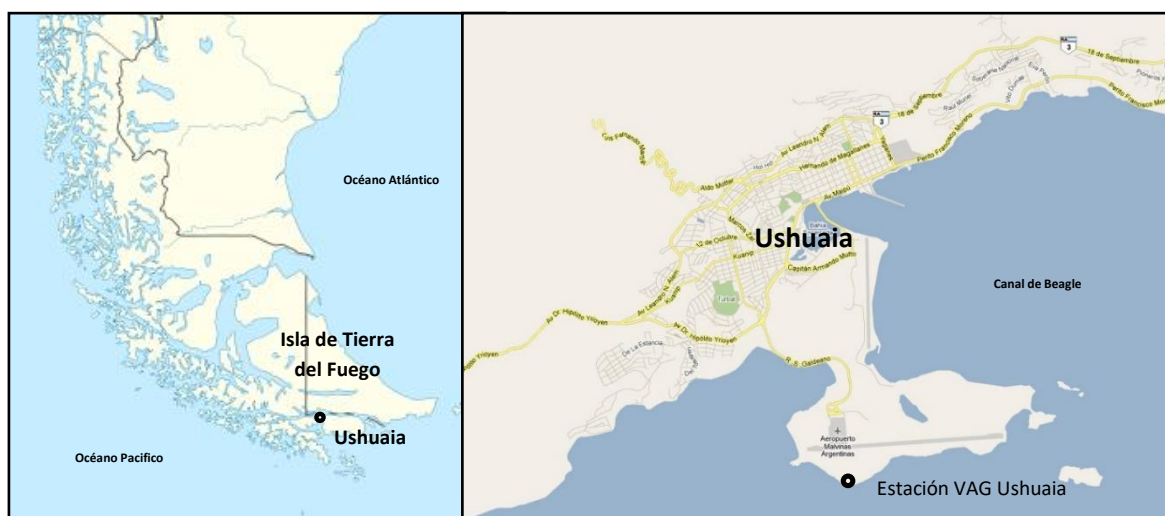
## **MÉTODOS**

La estación VAG Ushuaia (Figura 1), ( $54.84^{\circ}\text{S}$ ,  $68.31^{\circ}\text{W}$ , 18m) ubicada a 5 kilómetros al Sur de la ciudad de Ushuaia, está situada sobre un acantilado costero a una altitud de 18 metros sobre el nivel del mar, frente al Canal de Beagle y las islas de Navarino y Hoste (Figura 2).

Tierra del Fuego y toda su área oceánica adyacente se encuentran principalmente bajo la influencia de trayectorias de circulación atmosférica provenientes del oeste. En particular, la estación VAG, la mayor parte del tiempo está afectada por vientos predominantes del cuadrante S-SW, que corresponden al sector de aire “limpio”, o sea libre de contaminación local, lo cual permite registrar “condiciones de base” de la atmósfera.



**Figura 1.** Estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) Ushuaia – Ushuaia, Tierra del Fuego.



**Figura 2.** Ubicación de la estación VAG Ushuaia, en cercanías de la ciudad de Ushuaia, donde se llevó a cabo un monitoreo in situ el programas de muestreo de frascos de NOAA - SMN.

En la estación Ushuaia se llevaron a cabo mediciones discretas registrando concentraciones de COV, entre los cuales se encuentran Etano, Propano, I-Butano, I-Pentano, n-Butano, y n-Pentano. Estos COV de origen antropogénico, provienen de las emisiones de extracción del gas y petróleo.

Las series de datos obtenidas en la estación, corresponden a mediciones son discretas, del período 2005 al 2018. Las mismas obtenidas mediante un sistema de muestreo portátil, el cual se ubica en la plataforma de la estación, de esa forma el sistema queda expuesto directamente a las masas de aire provenientes desde canal de Beagle. El sistema de muestreo (Figura 3) consta de una cofre que contiene los dos flask de boro silicato de 2,5 L de capacidad donde se colectara la muestra de aire, una bomba de aire que hará ingresar el aire al sistema de muestreo, un medidor de caudal y uno de presión y las correspondientes conexiones y válvulas de paso de pistón de vidrio selladas con juntas de teflón, para el ingreso y salida del aire. La toma de muestra consiste en bombear aire a través del par de flasks conectados en serie durante 5 minutos, luego se cierra la salida de los mismos y se sigue bombeando aire, hasta una presión determinada (aprox. 1,2 atm) por un minuto. Por último se cierran las válvulas de entrada a los flask para mantener la muestra sellada. Posteriormente se envían para su análisis al Global Monitoring Laboratory (GML) en NOAA.



**Figura 3.** Sistema de muestreo portátil con el cual se llevó a cabo un monitoreo in situ el programas de COV en la estación VAG Ushuaia.

Cada muestra se acompaña con la información meteorológica de dirección e intensidad del viento. Las muestras de aire son realizadas con una frecuencia semanal, siempre que se den las “condiciones de base” o sea cuando el viento proviene del sector S-SW. En este trabajo se consideraran, que cada dato de concentración obtenida corresponde a la concentración obtenida de una muestra, a partir de las cuales se obtuvieron las concentraciones medias mensuales, calculando los promedios con las muestras registradas durante ese mes.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

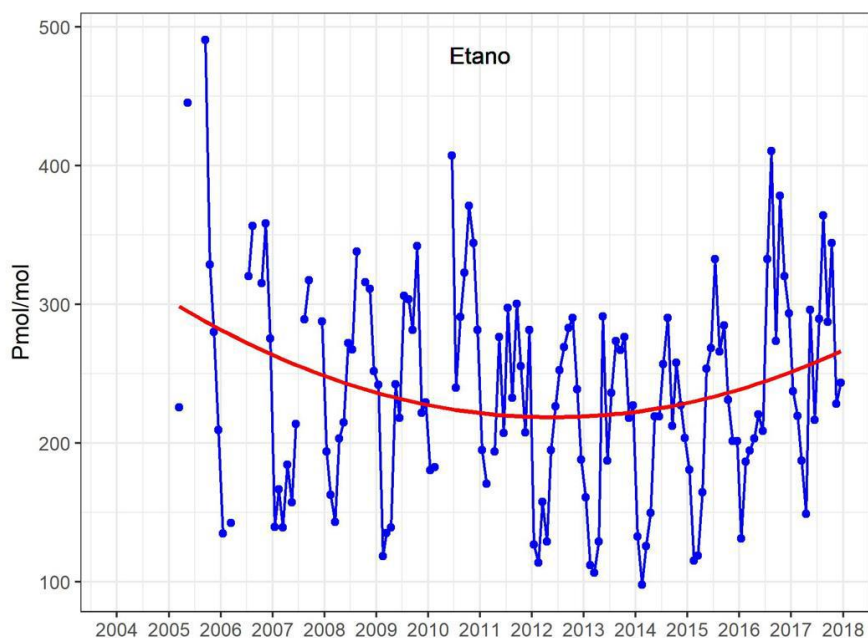
Con el potencial de dispersarse a grandes distancias, los COV se han convertido en uno de los principales contribuyentes a la contaminación del aire mundial. Los COV se liberan a la atmósfera desde una variedad de lugares y las emisiones de estas fuentes se transforman químicamente, mezclándose con otras masas de aire antes de llegar al sitio de muestreo.

Las series de datos de Etano, Propano, I-Butano, I-Pentano, n-Butano y n-Pentano obtenidas en la estación Ushuaia se mostrarán en las siguientes figuras.

El Etano es un COV proveniente de la extracción del gas natural y del procesamiento del petróleo. Las concentraciones de etano son por lo general mucho más altas en el hemisferio norte, y el ciclo estacional también es mucho más pronunciado en ese hemisferio. La concentración máxima de etano tiene lugar en invierno en ambos

hemisferios, de manera que los ciclos estacionales en los dos hemisferios tienen seis meses de desfase. En la Figura 4 se muestra las concentraciones de Etano obtenidas del muestreo en la estación Ushuaia, observándose en las mismas la variación anual del gas, con máximos en invierno y mínimos en verano.

El Etano es un trazador de las tendencias hemisféricas de las emisiones de combustibles fósiles, dado que tiene una vida en la atmosfera de un mes y medio aproximadamente.

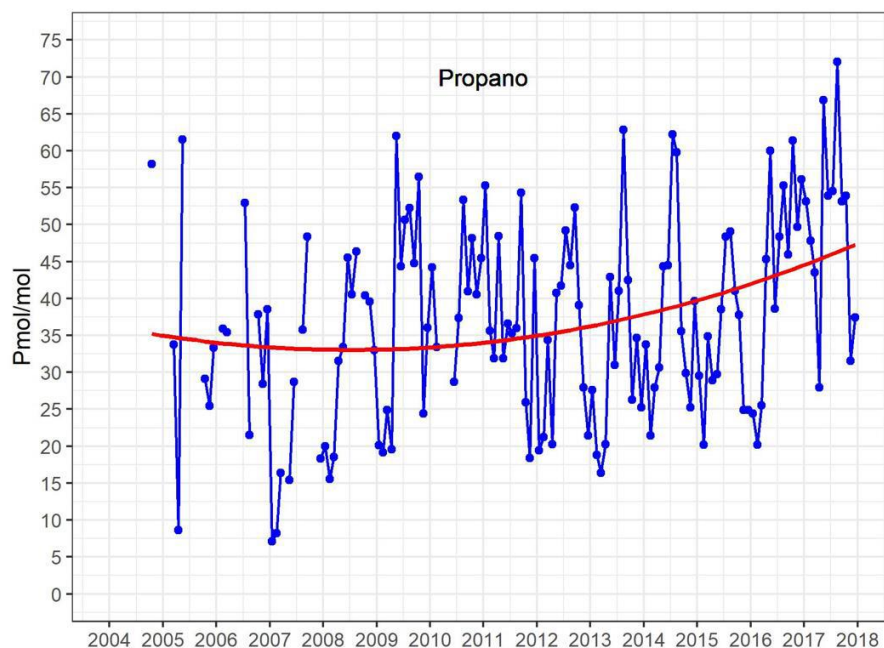


**Figura 4.** Serie de mediciones discretas in situ de Etano registradas en la estación VAG Ushuaia, en acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division (NOAA) del 2005 al 2018. Los puntos azules representan los datos promedios mensuales de las concentraciones registradas a través de flask y las líneas rojas representan el ajuste polinomial.

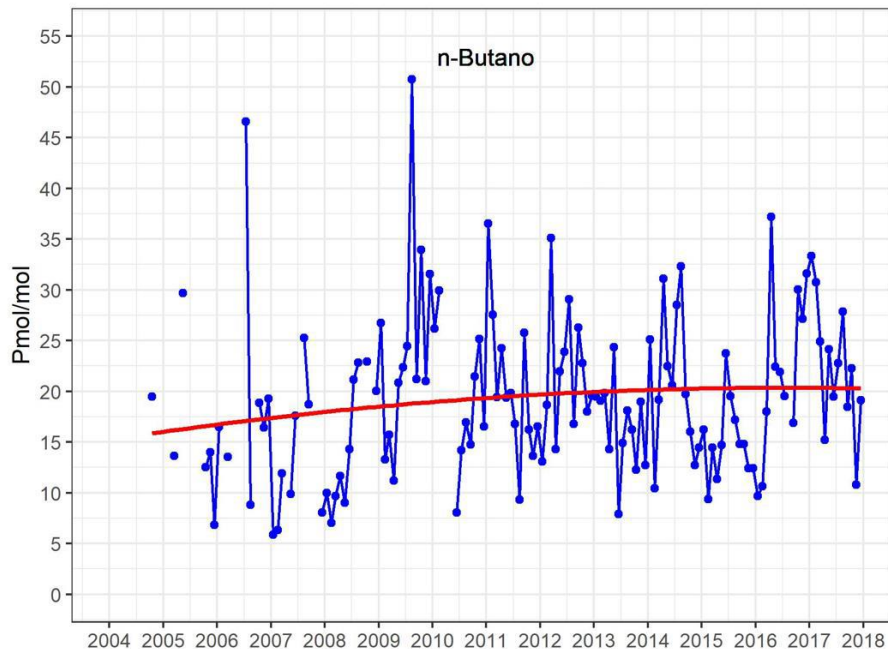
El propano es un compuesto orgánico volátil de vida corta, en la atmósfera persiste aproximadamente por unos 11 días, lo que no se encuentra lejos de su fuente. Existe una estrecha correlación entre las emisiones de etano y de propano.

El propano, al igual que el etano, permite reconocer e identificar la exploración y extracción de gas natural, de la quema de biomasa, de las fuentes de metano, y de las tendencias de las emisiones regionales de combustibles fósiles debido a su corta vida en la atmósfera. En la Figura 5 se muestra la serie obtenida a través del muestreo con flask en Ushuaia, donde se observa los ciclos anuales, con un comportamiento en los distintos ciclos estacionales similar al etano.





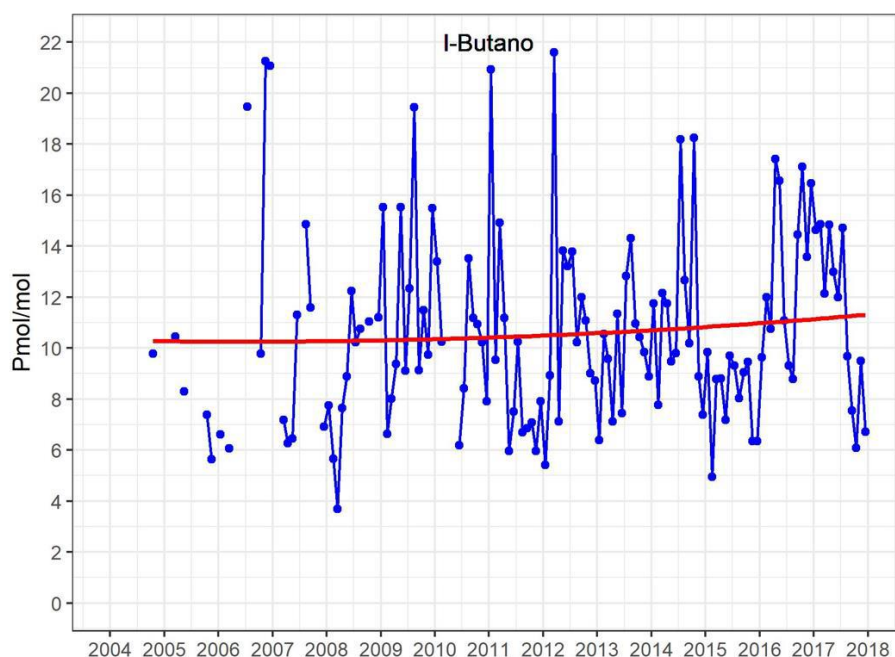
**Figura 5.** Serie de mediciones discretas in situ de Propano registradas en la estación VAG Ushuaia, en acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division (NOAA) del 2005 al 2018. Los puntos azules representan los datos promedios mensuales de las concentraciones registradas a través de flask y las líneas rojas representan el ajuste polinomial.



**Figura 6.** Serie de mediciones discretas in situ de n - Butano registradas en la estación VAG Ushuaia, en acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division (NOAA) del 2005 al 2018. Los puntos azules representan los datos promedios mensuales de las concentraciones registradas a través de flask y las líneas rojas representan el ajuste polinomial.

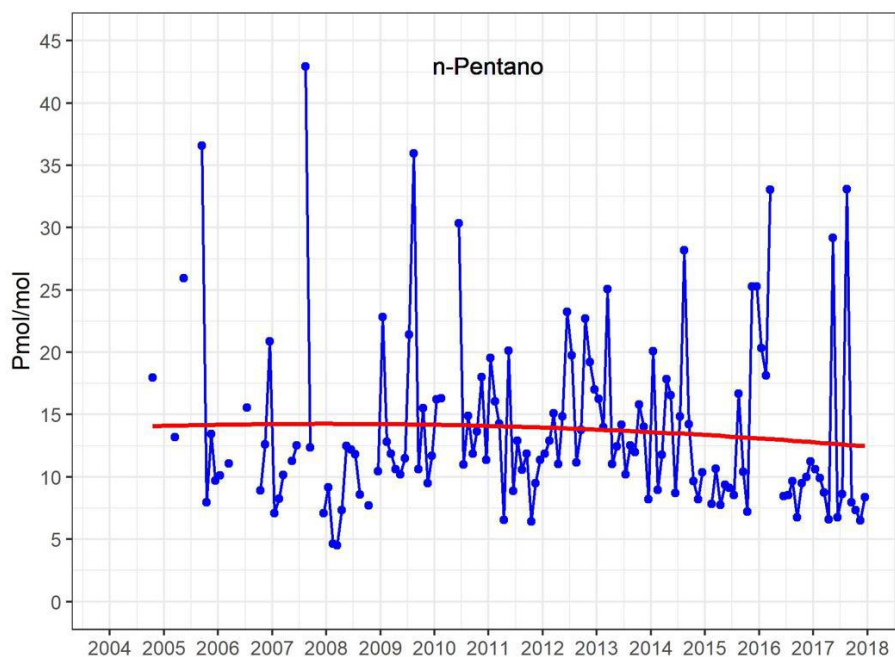
El n - butano y su isómero I-butano son alcanos de vida muy corta, una vez emitidos solo persisten aproximadamente 5 días en la atmosfera. Ambos son trazador de la exploración y procesamiento petroquímicos, de la extracción y uso de gas natural. Son COV precursores del ozono, formando el smog.

En las Figura 6 y 7 podemos ver las series de concentración de n- butano e I- butano respectivamente.

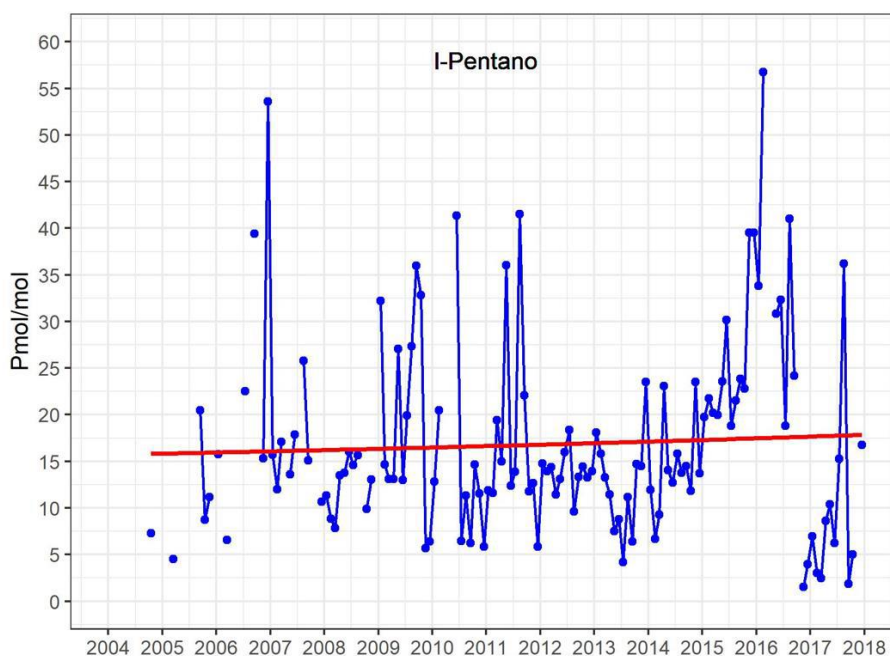


**Figura 7.** Serie de mediciones discretas in situ de I - Butano registradas en la estación VAG Ushuaia, en acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division (NOAA) del 2005 al 2018. Los puntos azules representan los datos promedios mensuales de las concentraciones registradas a través de flask y las líneas rojas representan el ajuste polinomial.

Los alcanos n-pentano e I-pentano se analizaron también en el muestreo con Flask en Ushuaia, debido que intervienen en la exploración y procesamiento de las industrias petroquímicas y químicas. La serie obtenida durante el proyecto de muestreo se muestran en las Figuras 8 y 9.



**Figura 8.** Serie de mediciones discretas in situ de n- Pentano registradas en la estación VAG Ushuaia, en acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division (NOAA) del 2005 al 2018. Los puntos azules representan los datos promedios mensuales de las concentraciones registradas a través de flask y las líneas rojas representan el ajuste polinomial.



**Figura 9.** Serie de mediciones discretas in situ de I-Pentano registradas en la estación VAG Ushuaia, en acuerdo con la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory - Global Monitoring Division (NOAA) del 2005 al 2018. Los puntos azules representan los datos promedios mensuales de las concentraciones registradas a través de flask y las líneas rojas representan el ajuste polinomial

## CONCLUSIONES

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se emiten a la atmósfera desde una amplia variedad de fuentes, tanto naturales como artificiales y sus vidas que varían de minutos a meses. Los sumideros incluyen reacciones químicas con OH, ozono y radicales de nitrato, y la deposición en la superficie de la Tierra. Los COV reaccionan para la formación de ozono superficial y además pueden condensarse en aerosoles. En ambos casos produciendo daño en la salud humana y al ambiente.

Desde la creación del Proyecto VAG, en 1989, este ha coordinado una extensa red global de mediciones de gases de alta calidad, poniendo énfasis en la calidad de los datos para poder brindar información a la comunidad científica y así desarrollar una perspectiva global sobre la distribución y las tendencias de los gases en la atmósfera.

El programa actual de gases reactivos dentro del Proyecto VAG se centra en el ozono, el CO, el NO<sub>x</sub>, el SO<sub>2</sub> y los COV. El programa de medición de COV, ofrece información sobre procesos valiosos, como las fuentes de metano, procesamiento petroquímico, extracción de gas natural y quema de biomasa, tal como muestran los compuestos analizados en este trabajo. En ese marco es que la estación VAG Ushuaia llevo a cabo el programa de medición de COV que se presentó en este trabajo.

Desde 1950 las concentraciones a nivel global de los COV atmosféricos (etano, propano, i-butano, n-butano, i-pentano, n-pentano) aumentaron considerablemente, hasta que durante la década de los 70' se implementaron regulaciones de diversas fuentes de emisión, por ejemplo para automóviles e industrias y se redujeron las emisiones de la producción de petróleo y gas natural. Estas medidas lograron reducciones significativas, hasta llegar en 2010 a concentraciones de 1950. Esta disminución puede observarse en las tendencias que mostraron los datos en los primeros años de muestreo de COV en Ushuaia. Esta tendencia siguió hasta mediados de 2009 donde se observa la abundancia del etano en el Hemisferio Norte aumentó a una tasa de 2,9 %–4,7 % por año (Franco et al., 2015, 2016; Hausmann et al., 2016). Este aumento también se ve reflejado en la mayoría de los COV analizados en Ushuaia, donde se ve cómo se incrementa la curva de la tendencia a partir de 2010 y creciendo sostenidamente hasta el final del programa de muestreo en 2018.

Así mismo observando los datos muestran estacionalidad en cada uno de los COV y con valores de concentración correspondientes a las del Hemisferio Sur (HS), e inferiores a las del Hemisferio Norte. En los ciclos estacionales, como se observan en el etano y el propano, las concentraciones se elevan al máximo durante el invierno, cuando las tasas de oxidación bajan como consecuencia del descenso en las concentraciones del radical OH, y los mínimos se logran en verano.

Debido a estas variaciones de los COV a lo largo de décadas, es fundamental continuar con el monitoreo de los COV a través de mediciones continuas a largo plazo, para establecer un registro de referencia de las condiciones de base, o sea en sitios sin la influencia del hombre, y observar sus cambios a lo largo del tiempo. En ese sentido la estación VAG Ushuaia es un sitio propicio para medir concentraciones de fondo, debido a su localización y al predominio de masas de aire de sectores sin influencia de las

actividades humanas. Si bien este programa finalizó, sería muy beneficioso reactivarlo y tener un monitoreo de COV en el Hemisferio Sur.

## REFERENCIAS

- Angot H., Davel C., Wiedinmyer C., Pétron G., Chopra J., Hueber J., Blanchard B., Bourgeois I., Vimont I., Montzka S.A., Miller B. R., Elkins J. W. and Helmig D. Temporary pause in the growth of atmospheric ethane and 2 propane in 2015-2018. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 15153–15170, 10.5194/acp-21-15153-2021 (2021).
- Pollack I.B, Helmig D., O'Dell K., and Fischer E.V. Weekend-Weekday Implications and the Impact of Wildfire Smoke on Ozone and Its Precursors at Boulder Reservoir, Colorado Between 2017 and 2019. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 10.1029/2021JD036385, 127 (11) (2021).
- Pollack I.B, Helmig D., O'Dell K., and Fischer E.V. Seasonality and Source Apportionment of Nonmethane Volatile Organic Compounds at Boulder Reservoir, Colorado, Between 2017 and 2019. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 126(9), 10.1029/2020JD034234 (2021).
- Rossabi S., Hueber J., Wang W., Milmoie P. and Helmig D. Spatial distribution of atmospheric oil and natural gas volatile organic compounds in the Northern Colorado Front Range. *Elem. Sci. Anth.*, 9 (1): 00036. 10.1525/elementa.2019.00036 (2021).
- OMM Boletín Los Gases Reactivos. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=3698](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3698) (2017).
- Franco, B., Marais, E. A., Bovy, B., Bader, W., Lejeune, B., Roland, G., Servais, C., and Mahieu, E.: Diurnal cycle and multi-decadal trend of formaldehyde in the remote atmosphere near 46° N, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 4171–4189, 10.5194/acp-16-4171-2016 (2016).
- Hausmann, P., Sussmann, R., and Smale, D. Contribution of oil and natural gas production to renewed increase in atmospheric methane (2007–2014): top–down estimate from ethane and methane column observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3227–3244, 10.5194/acp-16-3227-2016, (2016).
- Schultz M. G., Akimoto H., Bottenheim J., Buchmann B., Galbally I. E., Gilge S., Helmig D., Koide H., Lewis A.C., Novelli P.C., Plass-Dülmer C., Ryerson T.B., Steinbacher M., Steinbrecher R., Tarasova O., Tørseth K., Thouret V. and Zellweger C. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network. *Elem. Sci. Anth.*, 3, 000067, 10.12952/journal.elementa.000067 (2015).
- Franco, B., Bader, W., Bovy, B. et al. Recent increase of ethane detected in the remote atmosphere of the Northern Hemisphere 2015 • *EGU General Assembly* (2015).

# DESERTIFICACIÓN EN ARGENTINA: CAMBIOS ESPACIALES DE LA ARIDEZ DURANTE LAS ÚLTIMAS DÉCADAS (2000-2018)

Pedro S. Blanco<sup>a</sup> y Moira E. Doyle<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), CONICET-UBA, ARGENTINA.

e-mail: [pedro.blanco@cima.fcen.uba.ar](mailto:pedro.blanco@cima.fcen.uba.ar)

## RESUMEN

*Durante las últimas décadas, la desertificación ha provocado daños severos al medio natural, grandes pérdidas económicas y migraciones forzadas de la población. La aridez está estrechamente relacionada con la desertificación, dado que un déficit hídrico permanente en ambientes semiáridos y subhúmedos provocaría una expansión de las regiones áridas. En la investigación se pretende analizar los cambios de los patrones espaciales de la aridez en la República Argentina durante el período 2000-2018 e identificar las áreas del país que incrementaron su grado de aridez, a modo de obtener un diagnóstico de aquellos sectores más vulnerables a sufrir desertificación en el futuro. Por lo tanto, en este trabajo se utilizó el índice de aridez de De Martonne, que permite examinar el grado de aridez en base a datos de temperatura y precipitación, y se elaboró un conjunto de mapas temáticos que muestran los cambios y persistencia del índice. En general, la aridez en Argentina exhibe patrones espaciales que persisten a través del tiempo, pero las áreas limítrofes de las diferentes categorías avanzan (ganan) o retroceden (pierden) sobre regiones ocupadas por otras categorías. Desde principios del siglo XXI hasta la actualidad, un 5.6% del territorio nacional se ha vuelto más árido, siendo 155676 km<sup>2</sup> de superficie en términos absolutos. En efecto, las áreas del país más afectadas han sido las Sierras Subandinas y los Andes hacia el sur de los 30°S. Estas conclusiones pueden ser útiles para generar estrategias de mitigación y adaptación a la desertificación en lugares que se han vuelto más áridos y, por lo tanto, son los más vulnerables a sufrir este fenómeno en el futuro.*

Palabras Clave: Riesgo climático, Estructura espacial, Semiárido, Aridificación, Ganancias y pérdidas.

## INTRODUCCIÓN

La desertificación es un proceso complejo que consiste en la degradación parcial o total de las tierras secas (áridas, semiáridas y subhúmedas secas), principalmente como consecuencia de la variabilidad climática y las actividades antrópicas (UNCCD, 1996). En este sentido, dicho proceso depende de múltiples factores (biofísicos y socioeconómicos) que se conjugan para dar origen a la degradación sistemática de los suelos. Entre los factores se advierte que la creciente aridez y la recurrencia de sequías actúan como agentes catalizadores de la desertificación (Abraham *et al*, 2014), ya que tales condiciones climáticas combinadas con prácticas humanas inadecuadas (deforestación, sobrepastoreo, agricultura no sostenible, contaminación, etc.) repercuten nocivamente en las propiedades fisicoquímicas y dinámicas de las tierras (Geist H. J. and Lambin E. F., 2004).

La aridez es una condición climática caracterizada por la escasez natural y permanente de agua en el ambiente (Alonso J. A. and García J. A., 2009). Aunque diversos autores incorporan otros elementos a esta definición, se entiende que la aridez es un fenómeno

estructural asociado a un déficit hídrico que persiste a lo largo del tiempo, pudiendo detectarse regiones áridas y húmedas en torno a la relación entre la precipitación y la demanda evaporativa de un área particular (Neira-Mendez, 2006; Greve *et al*, 2019). En efecto, la aridez y la desertificación son dos términos que están asociados, ya que la deficiencia persistente de humedad, combinada con factores climáticos (altas temperaturas, abundante evaporación, etc.) y antrópicos (prácticas agrícolas inadecuadas, pastoreo excesivo, etc.), favorece la degradación de las tierras secas (Nicholson *et al*, 1998).

Si bien la distribución de regiones áridas y sus variedades a nivel global son bien conocidas (Cherlet *et al*, 2018), en las últimas décadas se ha registrado un incremento de la aridez en diversas partes del planeta. Por ejemplo, el Mediterráneo, América Central, Sudáfrica, entre otros han experimentado dicho proceso con un alto nivel de confianza (IPCC, 2021). Respecto a ello, el cambio del clima hacia un estado más árido puede impulsar alteraciones ecológicas a largo plazo (Neilson *et al*, 2017; Lian *et al*, 2021) y tener efectos nocivos en la agricultura, la calidad del agua, la productividad de la vegetación, la mortalidad de los bosques y la biodiversidad, etc. (Park *et al*, 2018). En la Argentina se proyecta que algunos sectores como la Cordillera de los Andes y la Patagonia podría darse una mayor aridez como consecuencia de una disminución de las precipitaciones en relación a la demanda evaporativa, aumentando el riesgo a sufrir desertificación en el futuro (IPCC, 2021). En esa misma línea, los usos no adecuados y las prácticas insostenibles de la tierra elevan los niveles de riesgo de desertificación, especialmente en las áreas limítrofes de las regiones naturalmente áridas (Spinoni *et al*, 2015). En el presente trabajo se pretende, en primer lugar, analizar los cambios de los patrones espaciales de la aridez en Argentina durante el período 2000-2018 y, en segundo lugar, identificar las áreas del país que incrementaron su grado de aridez.

## MÉTODO

Un cambio progresivo del clima hacia un estado más árido podría detectarse en una disminución del valor del índice de aridez (Seager *et al*, 2014). Los índices de aridez son indicadores cuantitativos del grado de abundancia o deficiencia de agua en el ambiente. En la actualidad, existe una gran variedad de índices de aridez que han sido propuestos por diferentes autores u organismos según fines específicos. Entre ellos, se encuentra el índice de aridez de De Martonne (IA) que relaciona la precipitación (P) y la temperatura media (T) a través de un cociente para estimar el grado de aridez de un espacio determinado. Cabe destacar que a la temperatura media se le adiciona una constante de 10 para evitar valores negativos del índice (ver Ec. 1).

$$IA = \frac{P}{T+10} \quad (1)$$

De acuerdo con De Martonne (1926) y posteriores modificaciones hechas por otros autores, el índice de aridez presenta una categorización que permite identificar el grado de aridez de un lugar concreto (ver Tabla I). Esta clasificación propone que valores bajos corresponden a condiciones climáticas áridas (ej., de 0 a 5 es árido extremo o de 5.1 a 15 es árido), mientras que cifras altas del índice se asocian a condiciones húmedas (ej., de 30.1 a 60 es húmedo o más de 60 es perhúmedo o muy húmedo).

Tabla I. Categorización del índice de aridez de De Martonne. Fuente: Rivas-Sáenz (2021).

Índice de aridez (IA)	Categoría
0 – 5	Árido extremo
5.1 – 15	Árido
15.1 – 20	Semiárido
20.1 – 30	Subhúmedo
30.1 – 60	Húmedo
> 60	Perhúmedo

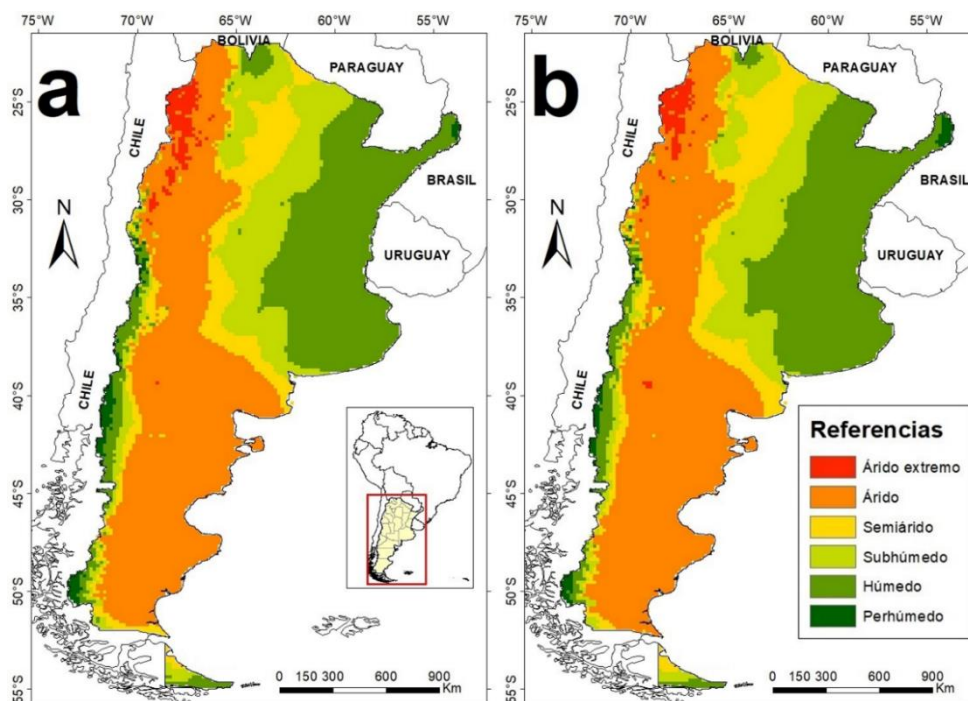
En la investigación se utilizaron datos anuales de temperatura media y precipitación del período 2000-2018, en un grillado de 0.1° de latitud por 0.1° de longitud del territorio continental americano de la República Argentina. La fuente de tales datos ha correspondido al *Climatic Research Unit* (CRU TS v4.03), los cuales fueron extraídos del sitio web WorldClim 2.1 (2021).

A partir de los períodos de análisis (2000-2009 y 2010-2018), en cada caso se elaboró un campo medio del índice de aridez con base en la clasificación de la Tabla I. Luego, para cada categoría del indicador se calculó la superficie que ocupa en el país y la diferencia de la misma entre los dos períodos. Posteriormente, a través del módulo *Land Change Modeler* (LCM) en el software TerrSet® se realizaron mapas de ganancias/pérdidas/persistencia de cada categoría, los cuales permiten identificar los cambios espaciales de una variable comparando dos momentos distintos (Pontius *et al*, 2004). Por último, se representaron cartográficamente los intercambios entre categorías del índice para detectar aquellos espacios que se han vuelto más áridos o más húmedos (ej., si un espacio pasó de semiárido a árido indicaría que el cambio se orientó hacia una categoría más árida porque hubo una disminución del índice y, por ende, se incrementó la aridez; al contrario, si un lugar pasó de árido a semiárido se observa un aumento del índice y condiciones más húmedas).

## RESULTADOS

En la República Argentina se presentan estructuras espaciales del índice de aridez que persisten a través del tiempo (ver Fig. 1). Por un lado, una amplia región árida que se extiende desde el noroeste argentino hasta la Patagonia con un reducido sector árido extremo en el noroeste del país y, por otro lado, una región húmeda hacia el este del territorio nacional en la Planicie Chaco-Pampeana con un pequeño espacio perhúmedo hacia el extremo este en la Provincia de Misiones. Asimismo, entre tales patrones climáticos se identifica una transición árido-húmedo en sentido oeste-este, como así también existe un área húmeda particular que se dispone meridionalmente desde los 32°S hacia mayores latitudes en el extremo oeste de Argentina en la Cordillera de los Andes Centrales y Patagónico-Fueguinos. Por su parte, en el norte del país a los 65°O aproximadamente se observa un predominio de condiciones subhúmedas que interrumpen la distribución de las áreas semiáridas, que se corresponde con la topografía compleja asociada a las Sierras Subandinas.





**Figura 1.** Campos medios del índice de aridez de De Martonne para la República Argentina durante los períodos **a.** 2000-2009 y **b.** 2010-2018. Fuente: Elaboración propia con base en datos CRU TS v4.03 de WorldClim 2.1 (2021).

Al comparar las áreas ocupadas por cada categoría en Argentina entre los períodos de estudio (ver Tabla II), se advierte una disminución del 1.8% de las regiones subhúmedas (50331 km<sup>2</sup>), como así también de las categorías extremas (árido extremo y perhúmedo) con un menor porcentaje (0.4% y 0.3%, respectivamente). Por el contrario, los espacios semiáridos han crecido en un 1.3% (35230 km<sup>2</sup>), al igual que los sectores áridos (0.5%) y húmedos (0.7%). En tal sentido, de acuerdo con la definición de desertificación de la UNCCD (1996), la Argentina experimentó un aumento de las tierras secas, ya que las categorías “árido” y “semiárido” han incrementado 48127 km<sup>2</sup> de superficie del país.

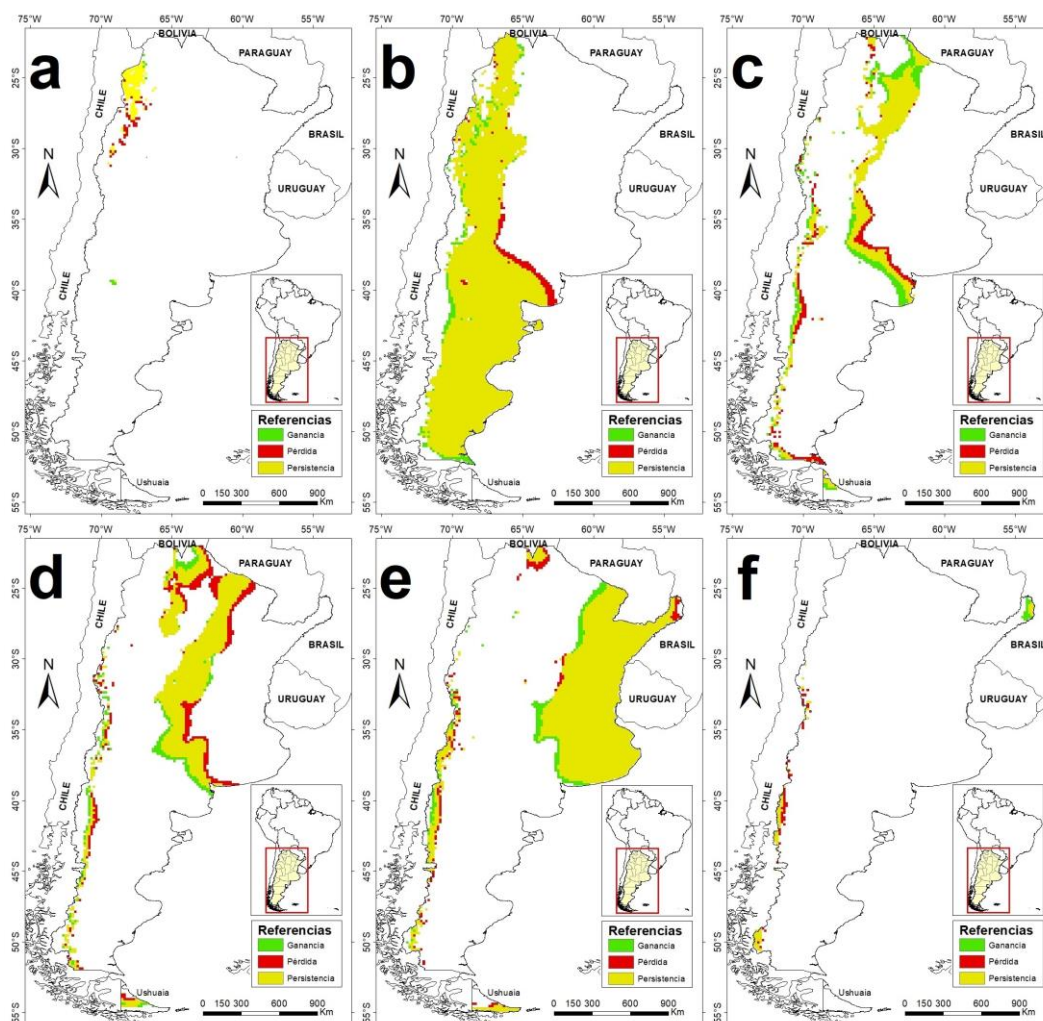
Tabla II. Superficie por categoría del índice de aridez de De Martonne en la República Argentina para los períodos 2000-2009 y 2010-2018. Fuente: Elaboración propia con base en datos CRU TS v4.03 de WorldClim 2.1 (2021).

Categoría	2000-2009		2010-2018		Diferencia	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
Árido extremo	57703	2.1	46121	1.7	-11582	-0.4
Árido	1071128	38.6	1084025	39.1	12897	0.5
Semiárido	313474	11.3	348704	12.6	35230	1.3
Subhúmedo	524218	18.9	473887	17.1	-50331	-1.8
Húmedo	769968	27.8	790775	28.5	20807	0.7
Perhúmedo	37857	1.4	30836	1.1	-7021	-0.3

Tal y como se presentó en páginas anteriores, si bien en la República Argentina se identifican ciertas estructuras espaciales que persisten a lo largo del tiempo, en las áreas limítrofes de las distintas categorías del índice de aridez se detectan cambios dados por avances (ganancia) o retrocesos (pérdida) de otras categorías. Por ello, para cada caso se muestran los sectores del país en los que hubo una ganancia o una pérdida de superficie, o una persistencia de la misma categoría comparando los campos medios del índice entre de los períodos 2000-2009 y 2010-2018 (ver Fig. 2).

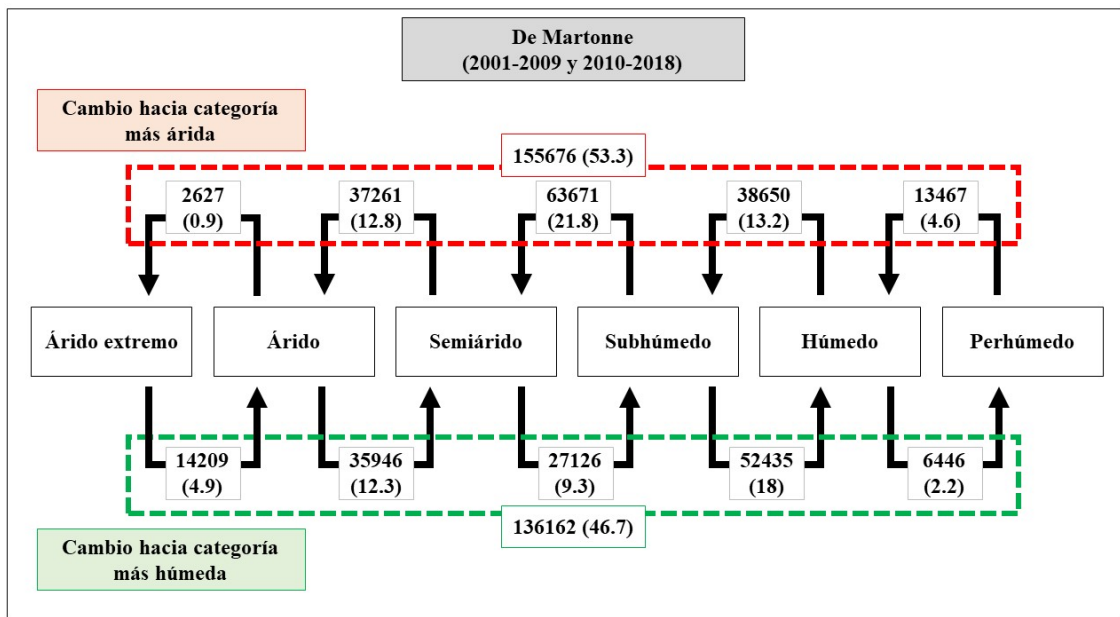
En general, todas las categorías exhiben amplios espacios con persistencia durante el período de análisis, lo que demuestra la existencia de las estructuras climáticas descriptas anteriormente. Sin embargo, cada categoría del índice tiene sus particularidades en cuando a la cantidad y distribución de las áreas que han ganado o perdido:

- **Árido extremo:** dada la localización de dicha categoría en un reducido sector hacia el noroeste argentino, la misma perdió más superficie de la que ganó en el período considerado, especialmente hacia el sur de su ubicación.
- **Árido:** de acuerdo con su distribución a nivel nacional, en el borde occidental de su estructura espacial ganó superficie, mientras que en el borde oriental entre los 34°-42°S hubo una pérdida que fue reemplazada por condiciones semiáridas.
- **Semiárido:** dicha categoría tuvo más ganancias que pérdidas de espacio, aunque esta situación es más notable en el norte del país entre los 62°-63°O y hacia el suroeste de la Provincia de Buenos Aires y centro de La Pampa. En el primer caso hubo un reemplazo de lo subhúmedo a lo semiárido (cambio hacia una condición más árida), mientras que, en el segundo caso fue de lo árido a lo semiárido (cambio hacia categoría más húmeda).
- **Subhúmedo:** se observa que mayoritariamente ha perdido área que fue sustituida por lo húmedo, aunque también hay una región de ganancia en detrimento de lo semiárido hacia el suroeste de Buenos Aires y centro de La Pampa.
- **Húmedo:** según su ubicación en la Planicie Chaco-Pampeana, dicha categoría ganó superficie hacia el oeste argentino, lo cual revela una expansión de las condiciones húmedas en lo que va del siglo XXI.
- **Perhúmedo:** en la Provincia de Misiones hacia el extremo este del país se advierte un reducido sector de ganancia, es decir, tal espacio se ha vuelto más húmedo entre los períodos de estudio, mientras que en los Andes Patagónico-Fueguinos se perdió superficie que fue reemplazada por lo húmedo, señalando una disminución del índice de aridez en términos cuantitativos.



**Figura 2.** Cambios y persistencia de las categorías del índice de aridez de De Martonne en la República Argentina entre 2000-2009 y 2010-2018. Se muestran las ganancias (verde), pérdidas (rojo) y persistencia (amarillo) de superficie para cada categoría: **a.** árido extremo, **b.** árido, **c.** semiárido, **d.** subhúmedo, **e.** húmedo, **f.** perhúmedo. Fuente: Elaboración propia con base en datos CRU TS v4.03 de WorldClim 2.1 (2021).

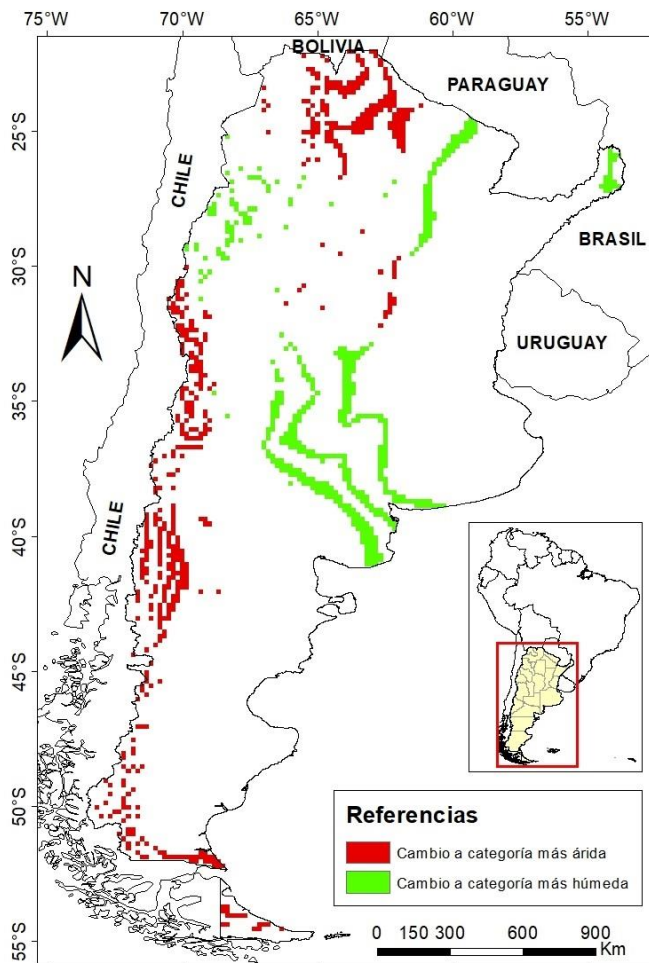
Si se consideran las cifras a nivel nacional de la superficie y el tipo de intercambio entre categorías del índice de aridez, se destaca que los cambios fueron entre categorías sucesivas (ej., orientado hacia un menor IA puede ser de subhúmedo a semiárido, de semiárido a árido, etc., o bien, hacia un mayor IA puede ser de árido a semiárido, de semiárido a subhúmedo, etc.). Sin embargo, tales intercambios no han sucedido en las mismas proporciones, sino que ellos han variado más o menos dependiendo del tipo de cambio: por ejemplo, el mayor valor fue de subhúmedo a semiárido con un 21.8% (63671 km<sup>2</sup>), seguido de subhúmedo a húmedo con un 18% (52435 km<sup>2</sup>). En efecto, si se suman los porcentajes según el tipo de intercambio, se advierte que el 53.3% de ellos fueron hacia condiciones más áridas (155676 km<sup>2</sup>) desde principios del siglo XXI hasta la actualidad, mientras que el restante 46.7% se dio hacia categorías más húmedas con 136162 km<sup>2</sup> de superficie en el país (ver Fig. 3).



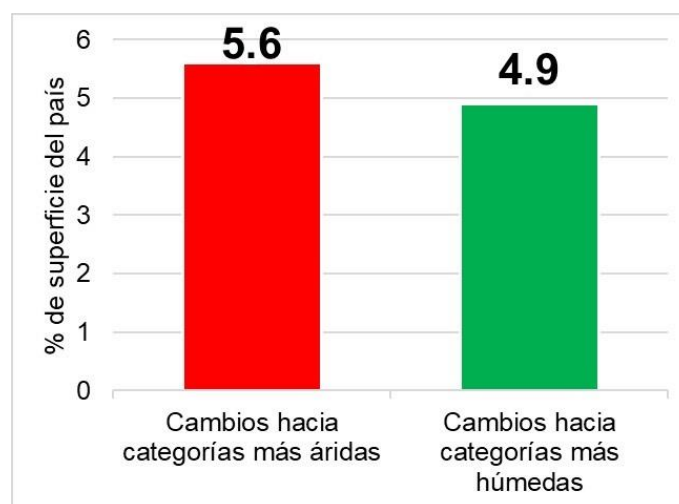
**Figura 3.** Esquema de intercambios entre categorías de índice de aridez de De Martonne, comparando los períodos 2000-2009 y 2010-2018. Se indica la superficie total de cambio expresada en km<sup>2</sup> y, entre paréntesis, en porcentaje respecto al total de cambios. Fuente: Elaboración propia con base en datos CRU TS v4.03 de WorldClim 2.1 (2021).

En concordancia con lo descrito anteriormente, los cambios espaciales del índice de aridez en la República Argentina no han sido homogéneos y se identifican regiones que se han vuelto más áridas o más húmedas: en el primer caso, las Sierras Subandinas y la Cordillera de los Andes Centrales (a partir de los 30°S hacia mayores latitudes) y Patagónico-Fueguinos han cambiado hacia condiciones más áridas; mientras que, en el segundo caso, parte de la Provincia de Misiones, oeste y suroeste de Buenos Aires, Chaco Occidental y parte de los Andes Centrales entre 25°-30°S se tornaron hacia categorías más húmedas (ver Fig. 4). Estos resultados son importantes porque, por un lado, comprueban los enunciados del IPCC (2021) acerca de que en la Patagonia y la Cordillera de los Andes se ha desarrollado en las últimas décadas una disminución progresiva de las precipitaciones respecto a la demanda evaporativa y, por otro lado, que tales regiones del país podrían ser las más afectadas por los procesos de desertificación en un futuro cercano.

Respecto a la superficie total de la República Argentina en su territorio continental (2774348 km<sup>2</sup>), los mayores cambios han sido hacia categorías más áridas con un 5.6% a comparación de los cambios hacia categorías más húmedas con un 4.9% (ver Fig. 5). Si bien se reconoce que sólo alrededor del 5.6% del espacio de estudio se ha vuelto más árido, en términos absolutos no es una cifra menor ya que indica que 155 mil km<sup>2</sup> han sufrido el proceso de aridificación y, por lo tanto, podrían contribuir a una mayor degradación de las áreas desertificadas del país.



**Figura 4.** Cambios espaciales del índice de aridez de De Martonne en la República Argentina, comparando los campos medios de los períodos 2000-2009 y 2010-2018. Fuente: Elaboración propia con base en datos CRU TS v4.03 de WorldClim 2.1 (2021).



**Figura 5.** Porcentaje de superficie con cambios hacia categorías áridas y hacia categorías más húmedas entre los períodos 2000-2009 y 2010-2018, comparados con el área total del territorio continental de la República Argentina. Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

En general, la República Argentina posee patrones espaciales del índice de aridez que persisten a través del tiempo, aunque las áreas limítrofes de las diferentes categorías avanzan (ganan) o retroceden (pierden) sobre regiones ocupadas por otras categorías. En efecto, si se consideran las cifras a nivel nacional de la superficie y el tipo de intercambio entre categorías del índice, el 53.3% de ellos fueron hacia condiciones más áridas (155676 km<sup>2</sup>), mientras que los restantes se dieron hacia categorías más húmedas con un 46.7% (136162 km<sup>2</sup>). Respecto al territorio continental argentino (2774348 km<sup>2</sup>), los mayores cambios han sido hacia categorías más áridas con un 5.6% desde principios del siglo XXI hasta la actualidad, lo cual representa que poco más de 155 mil km<sup>2</sup> han sufrido un incremento de la aridez (aridificación) y, por lo tanto, podrían contribuir al proceso de degradación de las áreas desertificadas del país. Sin embargo, los sectores más afectados fueron las Sierras Subandinas y la Cordillera de los Andes a partir del sur de los 30°S (Andes Centrales y Patagónico-Fueguinos). Tales conclusiones podrían ser útiles para generar estrategias de mitigación y adaptación a la desertificación en lugares que se han vuelto más áridos y, por lo tanto, son los más vulnerables a sufrir este fenómeno en el futuro.

## REFERENCIAS

- Abraham, E., Rubio, C., Salomón, M., and Soria, D. *Desertificación: problema ambiental complejo de las tierras secas*, EDIUNC, Argentina, 2014.
- Alonso, J. A., and García, J. A. Precipitaciones, aridez, sequía y desertificación de la Comarca del Campo de Cartagena. *Lurralde. Inves. Espac.*, 32, 119-154 (2009).
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., and Von Maltitz, G. (Eds.). *World Atlas of Desertification*, Publication Office of the European Union, Luxemburgo, 2018.
- De Martonne, E. L'indice d'aridité. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 3 (9), 3-5 (1926).
- Geist, H. J., and Lambin, E. F. Dynamic causal patterns of desertification. *Bioscience*, 54 (9), 817-829 (2004).
- Greve, P., Roderick, M. L., Ukkola, A. M., and Wada, Y. The aridity index under global warming. *Environmental Research Letters*, 14 (12), 124006 (2019).
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, In Press, 2021.
- Lian, X., Piao, S., Chen, A., Huntingford, C., Fu, B., Li, L. Z., ... and Roderick, M. L. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2 (4), 232-250 (2021).
- Neilson, J. W., Califf, K., Cardona, C., Copeland, A., Van Treuren, W., Josephson, K. L., ... and Maier, R. M. Significant impacts of increasing aridity on the arid soil microbiome. *MSystems*, 2 (3), 1-15 (2017).
- Neira-Mendez, F. H. *Assessment of climate indices in drylands of Colombia* (Tesis doctoral), Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, Ghent, 2006.
- Nicholson, S. E., Tucker, C. J., and Ba, M. B. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (5), 815-830 (1998).
- Park, C. E., Jeong, S. J., Joshi, M., Osborn, T. J., Ho, C. H., Piao, S., ... and Feng, S. Keeping global warming within 1.5 C constrains emergence of aridification. *Nature Climate Change*, 8 (1), 70-74 (2018).

- Pontius Jr, R. G., Shusas, E., and McEachern, M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, ecosystems & environment*, 101 (2-3), 251-268 (2004).
- Rivas-Sáenz, S. (14/01/2021). *Otros índices bioclimáticos*. Recuperado de <https://webs.ucm.es/info/cif/form/indices.htm>
- Seager, R., Liu, H., Henderson, N., Simpson, I., Kelley, C., Shaw, T., ... and Ting, M. Causes of increasing aridification of the Mediterranean region in response to rising greenhouse gases. *Journal of Climate*, 27 (12), 4655-4676 (2014).
- Spinoni, J., Vogt, J., Naumann, G., Carrao, H., and Barbosa, P. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*, 35 (9), 2210-2222 (2015).
- UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification *Elaboración de una Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África*, Comité Intergubernamental de Negociación de las Naciones Unidas, Suiza, 1996.
- WorldClima 2.1 (25/05/2021). *Historical monthly weather data*. Recuperado de <https://worldclim.org/>

# DOS EVENTOS ATÍPICOS DEL AGUJERO DE OZONO SOBRE LA ANTÁRTIDA Y SU IMPACTO EN LA RADIACIÓN UV (2019 Y 2020).

Gerardo Carbajal Benítez<sup>a</sup>, Héctor R. Estévez<sup>b</sup> Pérez, Héctor Ochoa<sup>c</sup>, y María E. Barlasina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Servicio Meteorológico Nacional, ARGENTINA*

<sup>b</sup>*Red Solarimétrica, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.MÉXICO.*

<sup>c</sup>*Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino. ARGENTINA. ARGENTINA*

*e-mail: [gcarbajal@smn.gov.ar](mailto:gcarbajal@smn.gov.ar)*

## RESUMEN

*Es sabido que los Compuestos Destruyores de Ozono (CDO), tal como los clorofluorocarbonos (CFC's) son regulados por el Protocolo de Montreal y sienta las bases para entender que cuando existe voluntad política se pueden hacer bien al medio ambiente. El daño de los efectos del agujero de ozono, no solo es el impacto de la radiación ultravioleta, sino también en el clima tiene repercusiones, sobre todo en la Antártida. Con el descubrimiento del agujero de la capa de ozono durante la primavera en la Antártida a mediados de la década de 1980, reveló la amenaza que representan las sustancias que agotan la capa de ozono producidas por el hombre. El daño causado por estos compuestos expone a las personas y los ecosistemas de la Tierra a la dañina radiación ultravioleta. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar dos años atípicos de agujero de ozono sobre la Antártida, donde en el año 2019 se han presentado uno de los agujeros más pequeños que se tiene registro (Área entre el 7 de octubre - 13 de septiembre de 9,3 millones de km<sup>2</sup>) y el 2020 de los más profundos y más perseverantes (23,5 millones de km<sup>2</sup>), con la finalidad de analizar su impacto en la radiación solar en superficie. Esta situación expone al personal destinado en las bases Antárticas a elevados índices de radiación ultravioleta o a deficiencias en el desarrollo de la vitamina D por la falta de la misma. El análisis se realizará a través de las mediciones satelitales de las temperaturas mínimas en la estratosfera, la perturbación o quietud del vórtice polar (Potencial de Vorticidad), mecanismos de formación y destrucción de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) que contienen los CDO y la radiación ultravioleta. Se incluyen mediciones de las estaciones Antárticas Marambio, san Martín y Belgrano II.*

**Palabras Clave:** *Ozono, Antártida, Ultravioleta, Medición.*

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los 10 artículos más relevantes de la revista **nature**, se encuentra “El Descubrimiento del Agujero de Ozono en la Antártida” que cambió la perspectiva de las ciencias de la atmósfera y arrojó una de las políticas ambientales más exitosas de la historia, a nivel mundial, como lo es el Protocolo de Montreal (Solomon, 2019).

La firma y aplicación del protocolo de Montreal (1989), ha tenido como resultado una reducción y control de la emisión antropogénica de sustancias potencialmente destructoras de la capa de ozono. Ello parece haber frenado el incremento y retroceso



del llamado agujero de ozono antártico, aunque es importante señalar que sustancias tales como los CFCs tienen tiempos de vida media extremadamente largos, por más de 50 años, inclusive. De tal manera, que la recuperación de la capa de ozono se muestre después del año 2030, aunque ya se presentan signos de recuperación sobre todo en la tendencia del tamaño del agujero de ozono desde hace 10 años aproximadamente (Gil et al 2006, Carbajal et al 2019, 2020).

La ecuación de continuidad para el ozono en la estratosfera es:

$$\frac{\partial [O_3]}{\partial t} = P - L[O_3] - \nabla \cdot V[O_3]$$

Donde:

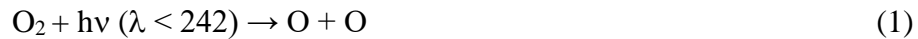
**P**; es la producción de O<sub>3</sub> en unidad de volumen por segundo [U/s], U = m<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, etc.

**L[O<sub>3</sub>]**; Es la pérdida de O<sub>3</sub> y es el producto de la frecuencia de la pérdida por la abundancia de O<sub>3</sub>.

**∇•V [O<sub>3</sub>]**; Es la divergencia de O<sub>3</sub> que representa el transporte neto de X dentro o fuera de la unidad de volumen por movimientos atmosféricos, que pueden ser positivos o negativos.

Las reacciones químicas que dominan el equilibrio en la estratosfera respecto al ozono son:

Formación de ozono:



Destrucción de ozono:



Los CFC's son unos de los compuestos que rompen el equilibrio, de esta manera es mayor la destrucción que la formación.



La interacción entre el ozono y la dinámica a gran escala en la estratosfera de la Antártida es claramente diferente a la de la estratosfera del Ártico, debido a las diferencias en la superficie subyacente. La Antártida está rodeada de manera más uniforme por el océano, que no impide la circulación zonal de los vientos en la corriente en chorro polar, lo que resulta en la aparición anual del vórtice polar estratosférico invernal mucho más fuerte y más aislado. Esto evita que el aire más cálido y rico en ozono de latitudes medias, se mezcle con el aire polar considerablemente más frío, que ha experimentado una pérdida de ozono inducida por halógenos. Por el contrario, el Ártico está rodeado por tierra y agua. Las cadenas montañosas y la convección sobre mar abierto, que por definición debe estar a una temperatura superior al punto de congelación, desvían parte de la trayectoria del chorro del polo norte y generan

ondulaciones. Estas ondulaciones, llamadas ondas de Rossby, debilitan la circulación polar, transportar aire más cálido de latitudes medias a la región del Ártico y disminuir la intensidad y la duración del vórtice polar del hemisferio norte (Banerjee et al 2020).

Como resultado de las condiciones meteorológicas, que son muy contrastantes en los dos hemisferios, la columna total el ozono en el invierno-primavera del Ártico, es siempre mayor que el de la Antártida. Incluso cuando se han producido pérdidas químicas inusualmente grandes de ozono Ártico durante temporadas de invierno-primavera que fueron anormalmente frías (p. ej., 1997 y 2011) (Banerjee et al 2020; Solomon, 2020).

El Objetivo de este trabajo es analizar dos eventos extremos de agujero de ozono que se presentaron en año 2019, siendo uno de los más pequeños y 2020 que ha sido uno de los más profundos, con la finalidad de establecer y contribuir al entendimiento de los mecanismos y principales causas dinámicas y químicas de la estratosfera que rigen la oscilación año tras año de dicho fenómeno estratosférico.

## MÉTODO

Las condiciones meteorológicas de la estratósfera antártica, durante el invierno austral (junio-agosto) sientan el escenario y las bases para la formación del agujero de ozono que ocurre año tras año en la Antártida, especialmente para el año 2019 y 2020 (WMO, 2016; Carbajal et al 2019; Carbajal et al 2020).

Se comparan dos años del agujero de ozono antártico que se consideran inusuales por la comunidad científica, 2019 y 2020, a través de los datos:

- De 1979–1992 son del instrumento TOMS a bordo del satélite NASA/NOAA Nimbus-7.
- De 1993–1994 son del instrumento TOMS a bordo del satélite Soviético Meteor-3.
- De 1996–octubre del 2004 son del instrumento TOMS del satélite de la NASA Earth Probe.
- De noviembre del 2004 – junio del 2016 del instrumento OMI (KNMI / NASA) a bordo del satélite Aura. Estos datos OMTO3d han sido procesados de manera similar que los datos del TOMS.
- Desde julio del 2016 son datos del instrumento OMPS a bordo del satélite Suomi NPP.

Y a través de los parámetros:

1. Temperatura mínima (altura 50 hPa) y Temperaturas latitudinales en la estratosfera de 60° a 90 ° (altura 50 y 10 hPa): Este parámetro determina, la formación de Nubes en la Estratósfera Polares (NEPs) que son reservas de sustancias destructoras del ozono estratosférico. Además, va a determinar la profundidad de la formación del agujero de ozono. Estas temperaturas son un buen indicador del enfriamiento y calentamiento estratosférico.

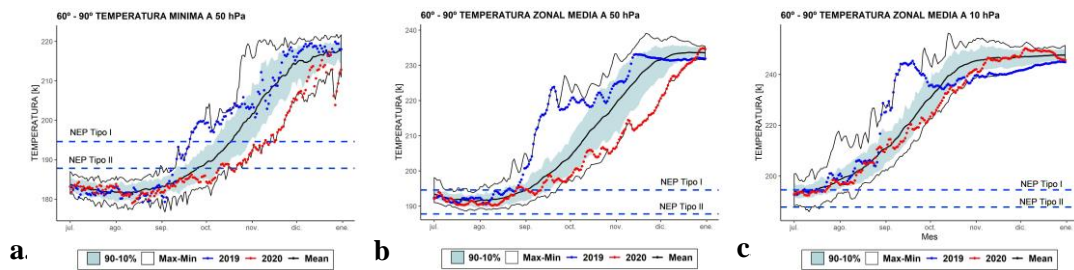
2. Área y volumen de las NEP's: Cuando las temperaturas continúan disminuyendo por debajo de los  $-85^{\circ}\text{C}$  ( $187.8^{\circ}\text{K}$ ), se formarán nubes que consisten en hielo de agua pura. Estas últimas son denominadas NEPs de tipo II. Estas NEP actúan como catalizadores heterogéneos (en fase sólida) de las moléculas reservorio, y ello provoca que se liberen sustancias como la molécula de cloro ( $\text{Cl}_2$ ) o el ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ) a través de diversos ciclos catalíticos. Estas NEP inician su formación durante el invierno austral y permanecen en estado inactivo hasta llegada de la primavera y con de la luz del sol, las descomponen para dar cloro atómico y activo, que actúa como catalizador en la destrucción de ozono en la estratosfera.
3. Estabilidad del vórtice polar Antártico: La presencia del vórtice polar durante el invierno austral, provoca un descenso de las temperaturas en la estratosfera, por debajo de los  $-78^{\circ}\text{C}$  ( $194.6^{\circ}\text{K}$ ). El flujo de calor promediado longitudinalmente entre los  $45^{\circ}\text{S}$  y los  $75^{\circ}\text{S}$  es una indicación de hasta qué grado está perturbada la estratosfera. Es decir, el flujo de calor que viene desde el trópico, puede indicarnos que tan fortalecido o debilitado el vórtice polar.
4. Área del agujero de ozono: Comparación con su media, máximos y mínimo, del periodo 1979 a 2018 (39 años).
5. Déficit de masa de ozono: El déficit de la masa de ozono se define como la cantidad de ozono medida en megatones que debe ser agregada al agujero, de tal manera que el ozono total llegue a 220 UD en aquellas regiones en las que se encuentra por debajo de este umbral. Este parámetro es también un indicativo de la profundidad que tiene el agujero de ozono y que está asociado al área y volumen de las NEP, así como al enfriamiento de la estratosfera.
6. Comparación de estaciones en superficie Marambio, Belgrano, San Martín y Ushuaia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la temperatura en la estratosfera antártica, muestra la gran diferencia entre el año 2019 y 2020 (ver Fig. 1).

El año 2019, las temperaturas venían oscilando alrededor de su media hasta inicios de del mes de septiembre, donde se observa un suceso inusual en la estratosfera antártica, un calentamiento súbito de la estratosfera, provocado por un fuerte transporte de flujo de calor desde la tropósfera tropical, hasta la estratosfera antártica, provocando temperaturas records e inclusive superando los máximos históricos del periodo 1979 a 2018, durante todo el mes de septiembre, este efecto se prolonga hasta mediados de noviembre.

Para el año 2020 sucede lo contrario al año 2019, un gran enfriamiento en la estratosfera, debido a un débil flujo de calor (cercano a la calma) desde la troposfera tropical hasta la estratosfera antártica. En el mes de octubre, se acentúa el enfriamiento por debajo de las mínimas históricas y en general se prolongan hasta fin de año,

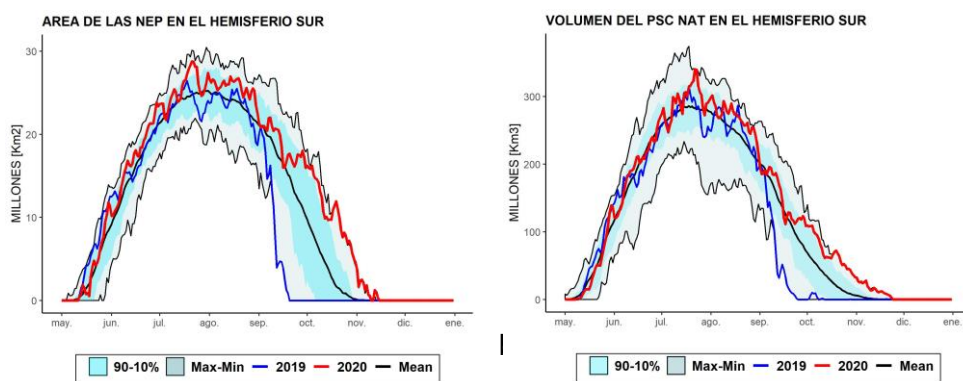


**Figura 1. a.** Temperatura mínima estratosférica entre el anillo de 60° a 90° de latitud a una altura de 50hPa. **b.** Temperatura zonal media entre los 60° a 90° latitud a una altura de 50hPa. **c.** Temperatura zonal media entre los 60° a 90° latitud a una altura de 10hPa. Las líneas horizontales muestran la temperatura a la cual se forman las NEP Tipo I y Tipo II.

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) son reservorios para los compuestos destructores de ozono en la estratosfera (CDO) y se forman dependiendo del enfriamiento que alcance la estratosfera, tal como se mencionó en la parte de metodología (Ver fig. 2).

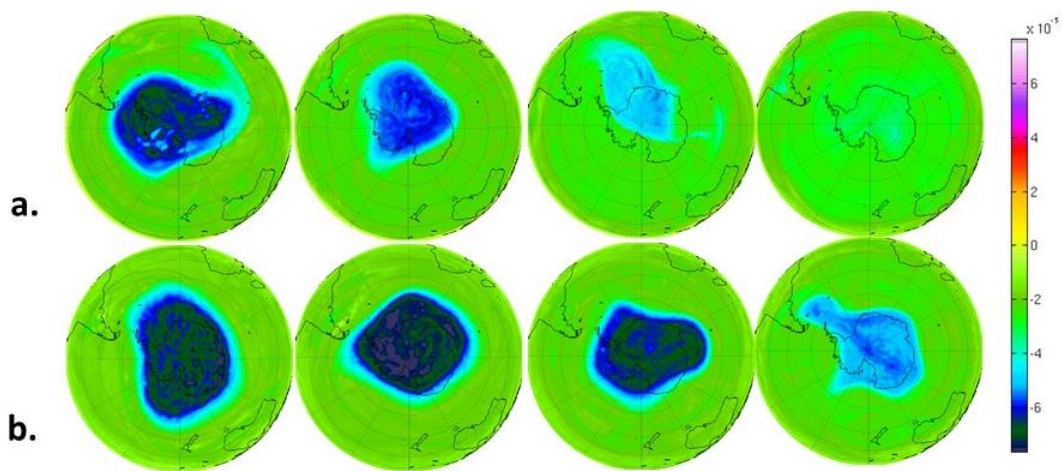
Para el año 2019, debido al calentamiento súbito en la estratosfera, fue muy poca la producción de NEP. Su área y volumen cayeron vertiginosamente durante septiembre, y a inicios de octubre, ya no había más NEP, comparado con la media histórica, estas normalmente terminan a finales de octubre. Por lo tanto, no había suficientes CDO disponibles para la destrucción de ozono.

Caso contrario, en el año 2020 las NEP tuvieron una mayor área y volumen que su media histórica, como resultado del enfriamiento estratosférico e incluso su producción se extendió hasta mediados de noviembre, lo que se convirtió en un gran reservorio de CDO.



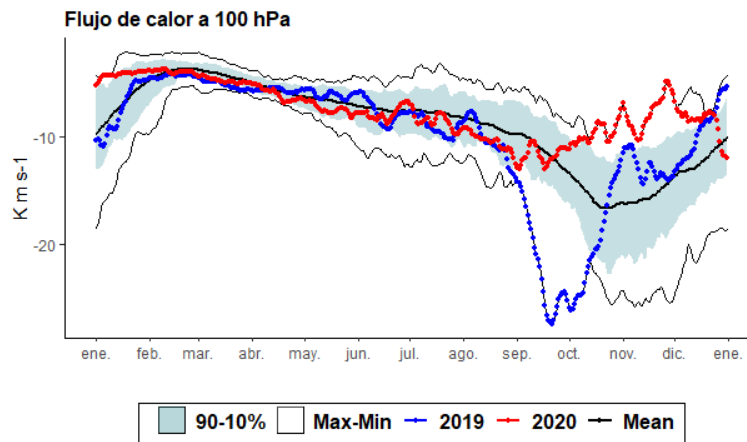
**Figura 2. a.** Área de las NEP. **b.** Volumen de las NEP.

El potencial e vorticidad es otro indicativo que muestra que tan intenso puede ser el agujero de ozono. Este parámetro nos muestra el vórtice polar que es el cinturón de vientos que circunda al oeste y se forma a partir de la noche polar. La temperatura dentro del vórtice va a depender que tan fortalecido el cinturón de vientos del oeste y entre más frío se encuentre al interior, habrá más temperaturas bajas y por lo tanto mayor formación de las NEP. En la Fig.3 se muestra el vórtice polar a través del potencial de vorticidad, donde se muestra el comparativo para ambos años, donde se observa que debido al calentamiento súbito en el año 2019, el vórtice se debilita y en el mes de noviembre y diciembre prácticamente se diluye. Mientras que en el 2020 se muestra un vórtice muy fortalecido que inclusive llega al mes de noviembre y poco a poco se diluye en el mes de diciembre.



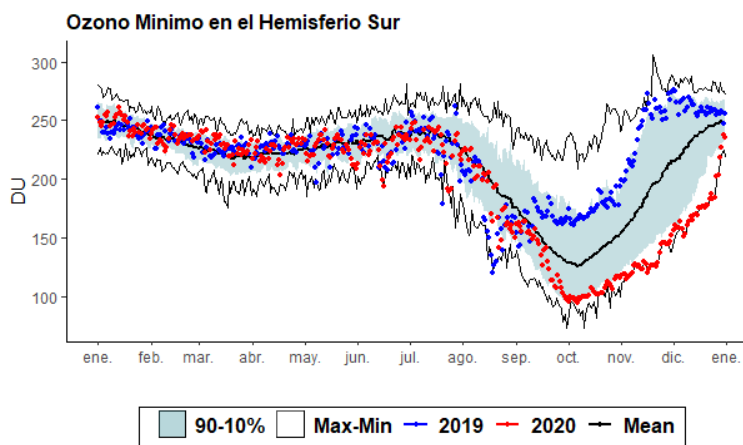
**Figura 3.** Mapas de vorticidad potencial (PV) mes a mes, a una altura isentrópica de 485 K, iniciando en el mes de septiembre y finalizando en diciembre. Los valores negativos más cercanos a cero, indican un vórtice débil (tono de color más claro), caso contrario los valores más negativos que se alejan del cero indica un vórtice muy fortalecido (Tono oscuro) **a.** año 2019. **b.** Año 2020.

El flujo de calor promediado longitudinalmente entre los 45°S y los 75°S es una indicación de hasta qué grado está perturbada la estratosfera, note en la Fig.4 que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. El calentamiento súbito de la temperatura en año 2019, se debe a un gran flujo de calor proveniente de la zona tropical, que permea el vórtice polar, inclusive por debajo esa de los valores, es decir la actividad fue más grande del periodo 1979 a 2018. Caso contrario para el año 2020, se observa muy poca actividad en cuanto al flujo de calor y muy cercano a la calma, lo cual tiene como consecuencia una gran estabilidad del vórtice polar (Fig. 4)



**Figura 4.** Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. Los puntos azules muestran los datos para 2019. Los puntos rojos muestran el año 2020.

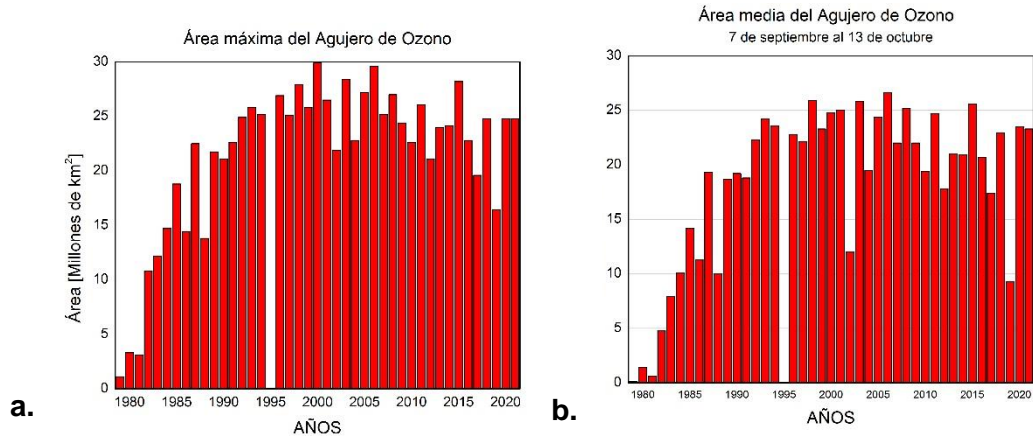
Al comparar el los mínimos de ozono en el hemisferio sur (Fig. 5), es obvio que para el año 2019, hay menor destrucción de ozono, debido a la poca formación de NEP que son los reservorios de CDO, mientras que para el año 2020 con muy bajas temperaturas y una gran formación de NEP, se observa gran destrucción de ozono, casi alcanzando valores mínimos históricos y en algunos casos caso por debajo del periodo 1979 a 2018



**Figura 5.** Serie de tiempo de valores mínimos de ozono. Los puntos azules muestran los datos para 2019. Los puntos rojos muestran el año 2020.

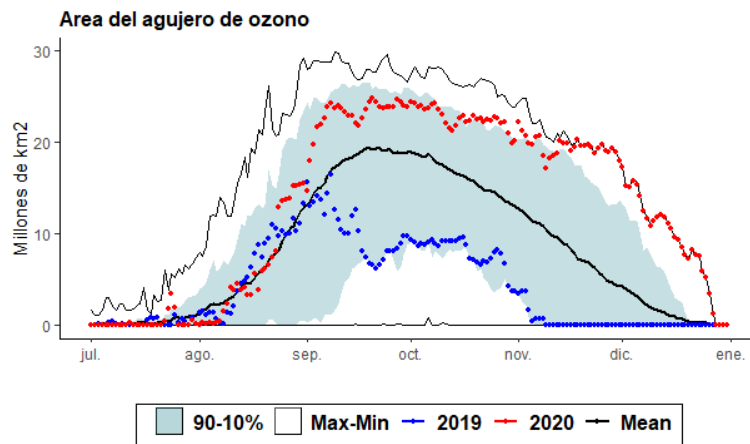
Si tomamos el valor máximo que se presenta año a año del tamaño del agujero de ozono, el agujero de ozono para el año 2019 ocupa el 34° lugar del periodo de 1979 a 2020 (41 años) con un máximo de 16,4 millones de kilómetros cuadrados, esto si tomamos del mayor a menor agujero de ozono. Mientras que el año 2020 ocupa el lugar 17° lugar del mismo periodo.

Ahora bien, el tamaño máximo del agujero de ozono, no se presenta el mismo día de cada año, éste va fluctuando del 7 de septiembre al 13 de octubre, si tomemos un promedio para esas fechas, obtenemos que el año 2019 tiene un área promedio de 9,3 millones de kilómetros cuadrados, ocupando el lugar 37° de mayor a menor del periodo 1979 a 2020. Mientras el año 2020 tiene un área promedio de 23,5 millones de kilómetros cuadrados ocupando el 12° lugar para el mismo periodo.



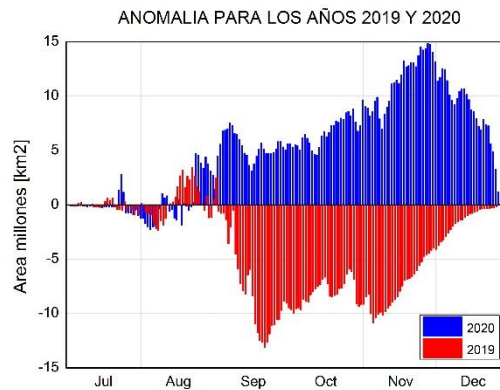
**Figura 6. a.** Área Máxima del de los agujeros de ozono y **b.** Área promedio del 7 de septiembre al 13 de octubre.

En la Fig. 7 se observa el comparativo de los dos agujeros de ozono y es clara la diferencia, remarcando que son dos años consecutivos.



**Figura 7.** Evolución y desarrollo de los dos agujeros de ozono, durante sus respectivos años.

En la Fig. 8 se comparan los dos agujeros de ozono, respecto a su anomalía y se puede observar mejor la diferencia que hay entre ellos



**Figura 8.** Comparación directa de los dos agujeros de ozono, a través de anomalía.

## CONCLUSIONES

Los años 2019 y 2020 de las temporadas del agujero de ozono han sido comparados, los cuales son consecutivos y marcan entre ellos una gran diferencia.

En el año 2019, la evolución del vórtice venía normalmente, acompañado de temperaturas mínimas bajas en la estratosfera y con ello la producción de las NEP, pero a inicios del mes de septiembre, se desarrolla un calentamiento súbito en la estratosfera, muy probablemente al gran transporte de calor desde el trópico, tan intenso que pudo perturbar la estratosfera y con ello inhibir la producción de las NEP por lo que hay muy poca destrucción de ozono e incluso el agujero de ozono se cierra antes de lo normal el día 8 de noviembre, situación que no se tiene registro.

Para el año 2020, el vórtice polar se desarrolla y evoluciona normalmente, pero se intensifica debido a que las condiciones de flujo de calor son muy bajas, e incluso muy cercanos a la calma, esto provoca un enfriamiento en la estratosfera con valores muy por debajo de la media histórica, inclusive en algunos momentos por debajo de los valores mínimos históricos. Este es el condimento esencial para un gran desarrollo de las NEP y como resultado gran destrucción de ozono muy por debajo de su media histórica y por momentos debajo de los valores mínimos históricos lo que produce un agujero de ozono muy profundo y muy persistente en el tiempo, esto como resultado de que las temperaturas mínimas en la estratosfera perduran hasta mediados de noviembre al igual que la producción de las NEP, cerrándose el agujero de ozono el 27 de diciembre, situación inédita de los 41 años que se tenían registro.

En términos generales, las condiciones meteorológicas y la dinámica de la estratosfera sientan las bases para el desarrollo de la NEP que contienen a los CDO, mientras que estos compuestos son los que destruyen directamente al ozono a través de ciclos catalíticos (química de la estratosfera)



Si bien existe una tendencia a la disminución del agujero de ozono en la Antártida, debido a la regulación de los clorofluorocarbones (CFC's) por el protocolo de Montreal, aún hay que realizar estudios y su monitoreo para continuar con su entrenamiento.

## REFERENCIAS

- Banerjee, A., Fyfe, J. C., Polvani L. M., Waugh, D., And Chang K. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol, *Nature*, Vol 579, 544-548, 2020.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 e Informe Final del Agujero de Ozono 2019. *Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, Argentina*.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 y 5. Temporada del Agujero de Ozono 2020. *Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, Argentina*.
- Carbajal Benitez Gerardo; Cupeiro Manuel; Sánchez Ricardo; Agüero Juan Daniel; Barlasina María Elena y Nollas Fernando. Caracterización de la Columna Total de Ozono medido con el Espectrofotómetro Dobson en cuatro estaciones en la Argentina. *EICES9*, ISBN 978-987-1323-36-4.
- Gerardo Carbajal Benítez, Héctor Estévez, Eduardo Luccini, Facundo Orte, Héctor Ochoa, Elian Wolfram, María Elea Barlasina, Lino Condori y Fernando Nollas. Pattern analysis of seven total ozone column measuring stations in the center, southern of South America and Antarctica. *Proceeding of Quadrennial Ozone Symposium (QOS) 2021*.
- Manuel Gil Ojeda "El ozono estratosférico" *Tethys*, 3, 47-58, 2006.
- Solomon, S. The discovery of the Antarctic ozone hole, *Nature*, Vol 575, 46-47, (2019).
- WMO "Ozone Hole Bulletin Antarctic" 2016.
- WMO "Ozone Hole Bulletin Arctic" 2016.

# PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DEL INTRUSIVO DE TUSHIN, ECUADOR

Darwin P. Condoy<sup>a</sup>, Christian W. Romero<sup>a,b</sup>, Milada<sup>b</sup> A. Dvořák

<sup>a</sup> Instituto de Investigación Geológico y Energetico, Quito, Ecuador.

<sup>b</sup> School of Geosciences, Faculty of Sciences Charles University, Praga, Republica Checa  
e-mail: [darwin.condoy@geoenergia.gob.ec](mailto:darwin.condoy@geoenergia.gob.ec)

## RESUMEN

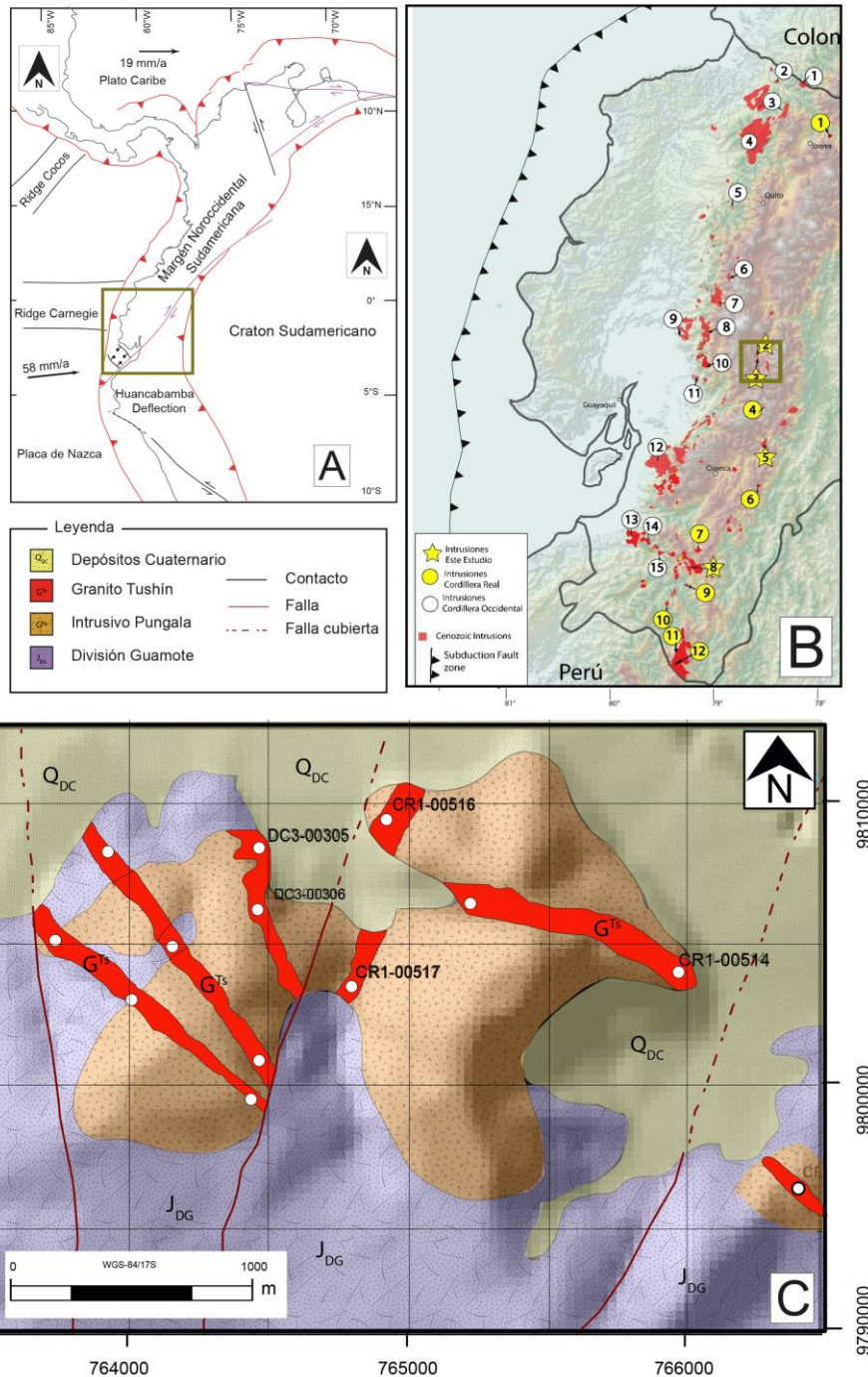
*El registro del magmatismo cenozoico en la margen noroccidental sudamericana ha sido previamente documentado en cuerpos intrusivos que afectan a rocas metamórficas de la cordillera Real en Ecuador. Esta investigación presenta datos petrográficos y geoquímicos de un intrusivo anteriormente no reportado al sur de Riobamba, en el flanco occidental de la cordillera Real. El intrusivo de Tushin constituye a un enjambre de diques que afloran a lo largo de 2Km de extensión, en dirección norte a noroeste. Este cuerpo intrusivo corta a la unidad Guamote y a la granodiorita de Pungala; y está compuesto por granitos (Gr), granodioritas (Gd) aplíticas. En base a la orientación de diaclasas y cizallamiento con respecto a la roca caja, se clasifica a esta red de diques como anastomosados a irregulares. Lámina delgada de granitos se observa texturas seriadas con cristales euhedrales bien desarrollados de plagioclasa y cuarzo. También se identificaron sectores con textura aplítica, manteada, granular y porfirítica. En las muestras analizadas el contenido de sílice en las rocas varía entre 67,76 y 62,53 wt. % y el contenido de álcali-total que van desde 4.06 a 5.32 wt. % sugiriendo series calco-alcalinas a calco-alcalinas de alto K. Anomalía negativa de Eu y anomalía positiva de Pb indican que estos cuerpos intrusivos se formaron en un ambiente de arco continental.*

Palabras Clave: Intrusivo Tushin, Geoquímica, Petrografía, Ecuador

## INTRODUCCIÓN

Los Andes del Norte son la principal característica morfológica de la margen noroccidental sudamericana, la margen continental ecuatoriana se localiza al sur de los Andes del Norte y al norte de la deflexión de Huancabamba (ver Fig. 1A). En Ecuador, los Andes se componen de dos cordilleras genéticamente distintas: la cordillera Occidental hacia el oeste separada por la depresión interandina de la cordillera Real hacia el este (Romero et al., 2021). Varios ciclos magmáticos han sido reportados en los Andes ecuatorianos (Aspend y Litherland, 1992). Al analizar la actividad magmática y volcánica de la Cordillera Real en el Paleógeno y Neógeno, observamos una actividad local y relativamente baja en comparación con la Cordillera Occidental y Valle Interandino (Guerrero, 2020) (ver Fig. 1B). En la Cordillera Real, en las cercanías a la ciudad de Riobamba, en el sector de Pungalá, Rundle, (1988) y Aspend y Litherland, (1992) reportaron inicialmente al Plutón de Pungalá (UTM 771317E, 9795158N), como un stock granodiorítico horbléndico datado en  $42 \pm 1$  Ma, recientemente Guerrero, (2020) reportó edades de cristalización (U/Pb) en circones de  $39 \pm 0.5$  y afinidad calco-alcalina alta en potasio. Las relaciones de corte de este Plutón fueron reportadas por Litherland et al., (1994), quienes indican que este Plutón se intruye en cuarcitas de la División Guamote. Este intrusivo se encuentra cubierto extensamente por depósitos volcánicos cuaternarios (Rundle, 1988).

Recientemente, al norte de Pungalá, en el sector de Tushin se reportaron una serie de enjambres de diques emplazados en el Pluton de Pungalá (ver. Fig. 1C), estos cuerpos no han sido reportados anteriormente, se desconoce el detalle de litológico, su petrografía, características geoquímicas, edad y ambiente de formación. Por lo cual, nuestro estudio presenta de manera inédita la caracterización de los diques de Tushin. Este trabajo es sustentado en la descripción litológica, relaciones de corte, análisis petrográficos y detalle geoquímico de muestras tipo del Intrusivo de Tushin, en la carretera Tushin a Pungalá.



**Figura 1.** Mapa de Ubicación. **A.** Esquema tectónico de la margen noroccidental sudamericana, modificado de Torres et al., (2020) y Romero et al., (2021). **B.** Distribución de intrusiones

Cenozoicas en la margen continental ecuatoriana, modificado de Guerrero, (2020). C. Mapa geológico de la zona de estudio.

## MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

En campo, la cartografía geológica incluyo la geo-referenciación de afloramientos y la discriminación litológica de muestras tipo. En cuanto al levantamiento de información estructural de diaclasas y fallas se consideraron los protocolos establecidos y descritos a detalle por Petit (1987). Imágenes satelitales permitieron filtrar lineamientos de la cartografía regional y redefinir trazos de fallas (ver Fig. 1C).

En afloramientos tipo se recolectaron siete muestras representativas que fueron utilizadas en secciones delgadas, con el objetivo de identificar y cuantificar facies minerales y describir su textura. El análisis semicuantitativo de difracción de rayos - X, permitió determinar firmas de espectrometría de facies minerales. Además, el detalle geoquímico incluyo la identificación y cuantificación de elementos mayores, elementos traza y tierras raras. Estos análisis fueron realizados en el laboratorio químico del Instituto de Investigación Geológica y Energético (IIGE), del Ecuador. En el procesamiento de las muestras se utilizaron trituradoras y pulverizadoras con discos de carburo de tungsteno, para análisis de elementos mayores se utilizó Fluorescencia de Rayos X - XRF (con perla fundida), para elementos traza, se utilizó Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente – ICP-OES (con digestión total 4 ácidos) y para tierras raras se empleó Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente – ICP-MS (con digestión por fusión alcalina). Los resultados de los análisis fueron reportados en base anhídrida, normalizada al 100%. El detalle completo de los análisis geoquímicos se presenta en la Tabla 1. Finalmente, para la generación de los diagramas de geoquímica se utilizó el software GCDKit 3.2 siguiendo los protocolos reportados por Yu, (2019).

Tabla 1. Análisis geoquímicos del Intrusivo de Tushin.

MUESTRA	DC3-00306-M1	DC3-00305-M1	CR1-00516-M1	CR1-00517-M1	CR1-00514-M1	CR1-00514-M2	CR1-00514-M3
<b>LITOLOGÍA</b>	Granodiorita	Granodiorita	Granodiorita	Granodiorita	Granito aplítico	Granito aplítico	Granito aplítico
<b>UTM-X</b>	763959	763977	764414	764294	765452	765452	765452
<b>UTM-Y</b>	9805623	9805837	9805944	9805347	9805378	9805378	9805378
<b>Elementos mayores</b>							
<b>SiO<sub>2</sub></b>	67,76	68,32	68,41	69,8	71,22	70,69	72,53
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,99	0,31	0,38	0,26	0,76	0,65	0,81
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14,32	11,26	10,22	14,25	13,34	12,03	10,22
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6,11	5,22	6,34	5,82	6,2	6,71	6,34
<b>MgO</b>	0,77	1,48	0,72	0,68	0,81	0,63	0,57
<b>MnO</b>	0,09	0,11	0,09	0,125	0,07	0,132	0,149
<b>CaO</b>	3,35	1,67	1,81	1,51	2,86	3,2	1,75
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	2,11	1,97	2,06	2,1	2,11	2,36	2,14
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,96	3,24	3,39	2,1	1,95	2,96	3,3
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,37	0,1	0,24	0,78	0,41	0,41	0,09
<b>LOI</b>	4,68	6,22	7,18	8,34	9,63	4,52	3,82
<b>Total</b>	98,83	93,68	93,66	97,425	99,73	99,772	97,899
<b>Elementos traza y tierras raras</b>							
<b>Sr</b>	116	123	86	107	98	106	88

V	2,23	2,31	1,22	1,81	1,26	1,86	2,26
Cr	3,82	5,63	3,21	3,99	1,48	2,04	3,96
Co	0,6	0,9	1,67	0,24	0,25	0,44	0,59
Ni	1,53	2,69	1,31	3,2	0,79	1,17	1,4
Cu	197	144	218	94,9	125	236	260
Zn	32,4	58,5	21,3	38,6	23,5	22,1	38,7
Ga	20,3	23,9	21,8	22,7	18,7	17,8	24,2
Rb	220	135	199	198	155	151	256
Y	12,36	10,8	17,8	11,29	13,45	12,8	11,8
Zr	6,54	6,87	7,16	3,8	2,89	2,74	7
Nb	13,52	22,8	17,64	11,29	18,22	21,64	20,8
Cs	101	91,5	90,2	89,3	105	100	110
Ba	33,1	41,5	37,4	33,9	42,9	57,3	51,6
La	2,08	2,65	3,4	2,69	1,63	1,72	2,33
Ce	5,3	6,12	6,83	4,37	3,08	2,7	5,5
Pr	0,64	0,84	0,86	0,69	0,41	0,43	0,74
Nd	2,52	2,98	2,8	4,55	3,01	3,02	2,62
Sm	0,99	1,05	0,91	0,95	0,67	0,68	1,13
Eu	0,05	0,07	0,1	0,15	0,11	0,13	0,1
Gd	1,03	1,15	1,01	1,22	0,85	0,85	1,1
Tb	0,25	0,27	0,22	0,24	0,17	0,17	0,25
Dy	1,48	1,59	1,3	1,34	1,01	0,97	1,49
Ho	0,19	0,21	0,17	0,22	0,17	0,15	0,2
Er	0,67	0,68	0,56	0,64	0,46	0,43	0,59
Tm	0,11	0,12	0,09	0,12	0,08	0,07	0,09
Yb	0,92	1,1	0,83	1	0,79	1,2	0,95
Lu	0,11	0,1	0,09	0,12	0,09	0,08	0,1
Hf	1,69	1,67	1,68	1,52	1,48	1,42	1,62
Ta	1,11	0,98	1,32	0,86	1,22	1,42	0,92
Pb	27,1	29,5	25,4	27,32	28,6	24,7	31,8
Th	1,72	1,56	1,56	1,71	1,12	1,62	1,59
U	22,3	21,3	23,6	22,3	22	20,1	26,6

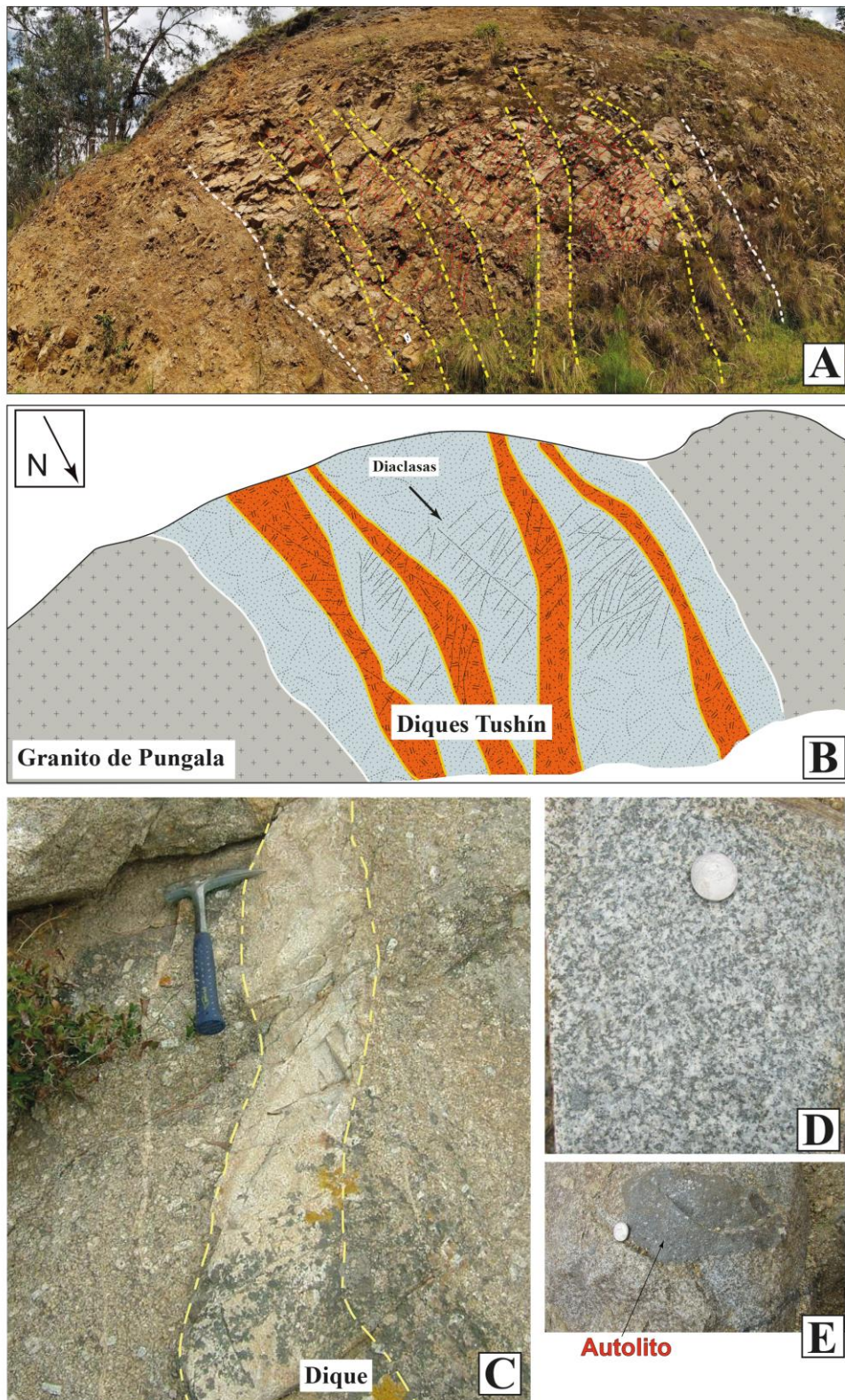
Óxidos son mostrados en % y elementos traza en ppm

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Relaciones de campo

Al sur de Tushin, cuarcitas y filitas deformadas de la División Guamote dominan el relieve y sus exposiciones se restringen al este de la Falla Ingapirca. En las inmediaciones de Pungalá, el stock granodiorítico Pungalá aflora en las márgenes del río Chambo, desde el sector de Cerro Puruhuay al sur hasta Tushin al Norte, de manera discontinua, a lo largo de 7 Km. El intrusivo Tushín constituye a un enjambre de diques que afloran al norte de Tushín, en 2Km de extensión, con dirección norte a noroeste. Este cuerpo intrusivo se emplaza en la unidad Guamote y en el intrusivo de Pungalá; está compuesto de granitos aplíticos (Gr) y granodioritas hornbléndicas (Gd). En base a

la orientación de diaclasas y cizallamiento con respecto a la roca caja se clasifica a esta red de diques como anastomosados a irregulares (ver Fig. 2).



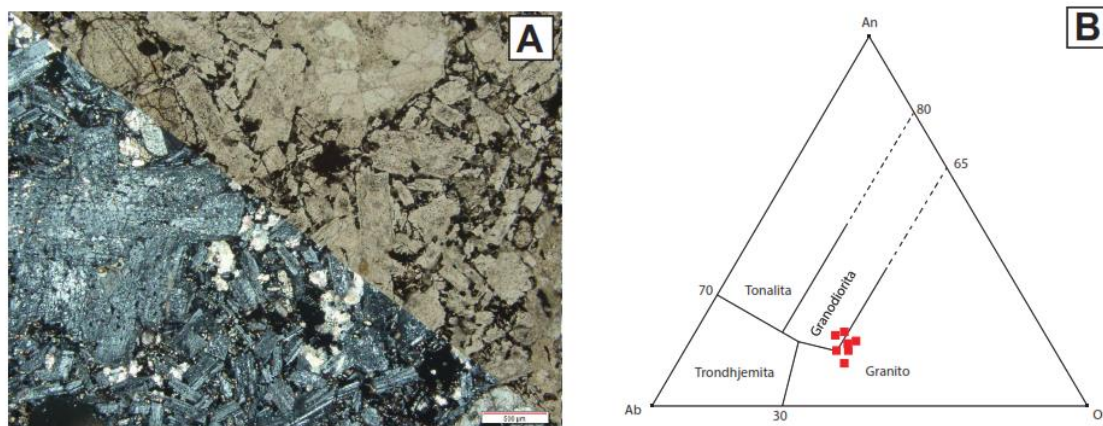
**Figura 2.** Afloramientos tipo del intrusivo de Tushin. **A.** Afloramiento tipo del intrusivo de Tushin. **B.** Esquema de la relación de corte entre el Granito de Pungalá y el intrusivo de Tushin.

C. Relación de corte entre el intrusivo de Tushin y el Granito de Pungalá. D. Litotipo del intrusivo de Tushin. E. Autolito diorítico en el granito aplítico de Tushin.

### Petrografía

Secciones delgadas de las muestras DC3-00306-M1, DC3-00305-M1, CR1-00516-M1, CR1-00517-M1 presentan textura holocristalina, fanerítica, hipidiomorfica, inequigranular; con cristales euhedrales de plagioclasa, feldespato de potasio y cuarzo. Mientras que en las muestras CR1-00514-M1 y CR1-00514-M2 se observan textura hipocristalina, porfirítica, con abundantes cristales inequigranulares de plagioclasa, hornblenda y cuarzo. La muestra CR1-00514-M3 presenta textura hipocristalina, aplítica con cristales inequigranulares de plagioclasa y hornblenda (ver Fig. 3A).

El análisis semicuantitativo de DFR-X permitió determinar que en las muestras DC3-00306-M1, DC3-00305-M1, CR1-00516-M1 tienen concentraciones moderadas a altas de hornblenda y plagioclasa. Mientras que en las muestras CR1-00517-M1, CR1-00514-M1 y CR1-00514-M2 y CR1-00514-M3 se observan bajas concentraciones de cuarzo. Por otro lado, en las muestras DC3-00306 y DC3-00305 se observan moderadas concentraciones de anortita, en las muestras CR1-00517-M1, CR1-00514-M1 y CR1-00514-M3, altos contenidos de albita. El diagrama de Barker (1979) permite discriminar la litología de rocas ígneas intrusivas no alteradas, en base a las proporciones modales de albita, anortita y oligoclasa. La Figura 3B indica que las muestras DC3-00306-M1, DC3-00305-M1, CR1-00516-M1 corresponden a granodioritas mientras que las CR1-00514-M1, CR1-00514-M2, CR1-00517-M1 y CR1-00514-M3 son ploteados en el campo de granitos (ver Fig. 3B).



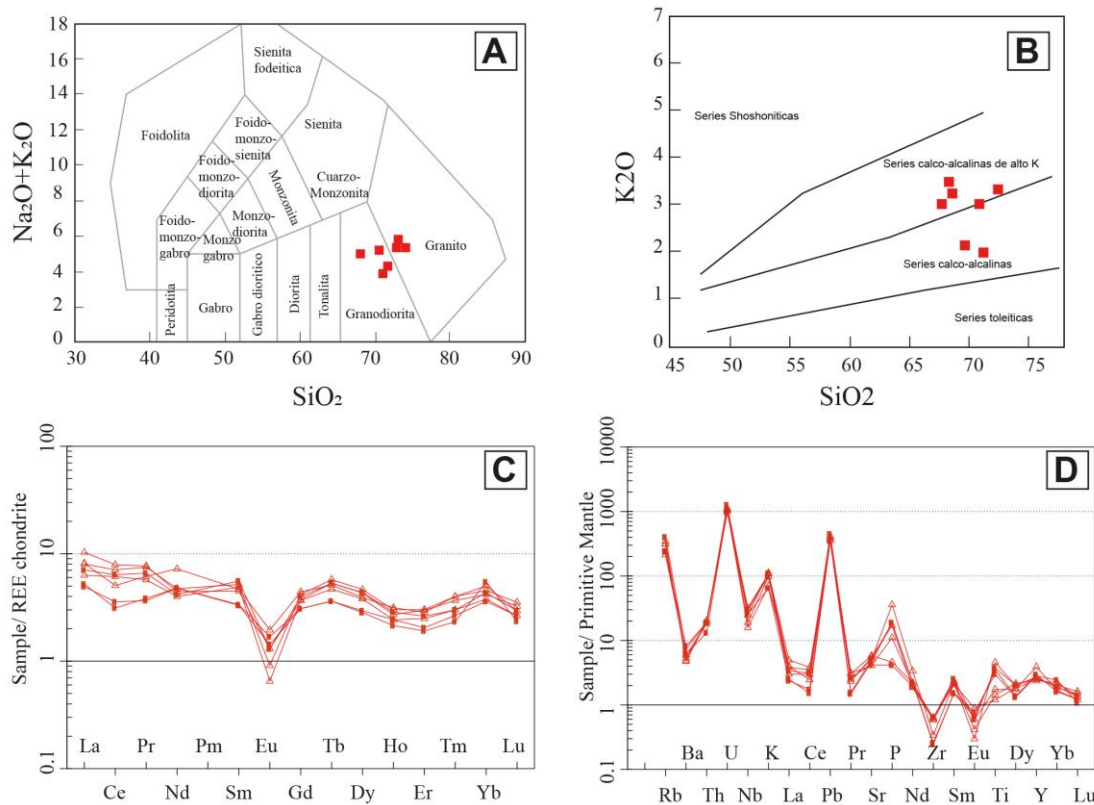
**Figura 3.** Petrografía del intrusivo de Tushin. **A.** Lámina delgada en luz natural y luz polarizada del intrusivo de Tushín. **B.** Diagrama de discriminación litológica de Barker, (1979).

### Geoquímica

El set de muestras analizado presenta altas concentraciones en SiO<sub>2</sub> (67.76–72.53 w%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10.22–14.32 w%) y álcali total (4.06 <K<sub>2</sub>O+NaO<sub>2</sub><5.32 w%), concentraciones intermedias de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5.22–6.71 w%) y bajas concentraciones de CaO (1.55–3.35 w%), MgO (0.57–1.48 w%) y TiO<sub>2</sub> (0.26–0.99 w%). Las concentraciones de *large ion lithophile elements* (LILE) como Rb, Ba, Sr y Th varían de 135-256 ppm, 33.1-57.3 ppm, 86-123 ppm y 1.56-1.72 ppm, respectivamente. El contenido de *high field strength elements* (HFSE) como Y, Zr y Nb varían de 10.8-13.45 ppm, 2.74-7.16 ppm y 11.29-13.45 ppm respectivamente. *Transition trace elements* (TTE) como V, Cr y Ni varían de 1.26-2.31 ppm, 1.48-3.96 ppm y 0.79-2.69 ppm respectivamente (ver Tabla 1).

La relación entre álcali total y sílice clasifica a las muestras DC3-00306-M1, DC3-00305-M1, CR1-00516-M1 y CR1-00517-M1 como granodioritas, mientras que a las muestras CR1-00514-M1, CR1-00514-M2 y CR1-00514-M3 como granitos (Middkemost, 1994) (ver Fig. 4A). Altas concentraciones de sílice ( $\text{SiO}_2 > 65\%$ ) y concentraciones moderadas de potación ( $1.53 > \text{K}_2\text{O} < 2.27$ ) sugieren afinidad calco-alcalina a calco-alcalina alta en potasio (Peccerillo y Taylor, 1976) (ver Fig. 4B). Altas a moderadas concentraciones modelos de Al, Na, K y Ca sugieren carácter metaluminoso (Maniar y Piccoli, 1989).

Elementos de tierras raras (REE) normalizados a condrita (Nakamura, 1974) de las muestras analizadas muestran ligero enriquecimiento en tierras raras ligeras (LREE) en comparación a tierras raras pesadas (HREE), además muestran patrones relativamente planos en HREE. Anomalía negativa de Eu, es controlada por el fraccionamiento de plagioclasa y sugiere cristalización fraccional del magma o contaminación cortical (Rollison, 1993) (ver Fig. 4C). Elementos de tierras raras (REE) normalizados a Manto Primitivo (Sun and McDonough, 1989) muestran fraccionamiento de HREE con respecto a LREE. Anomalía negativa de Eu, enriquecimiento de Pb y valores positivos de U y K son comunes en intrusiones formadas en ambiente de arco (ver Fig. 4D).



**Figura 4.** Geoquímica del Intrusivo de Tushin. **A.** Diagrama de discriminación litológica de Middkemost, (1984). **B.** Diagrama de discriminación de afinidad geoquímica de Peccerillo y Taylor, (1976) **C.** Normalización de REE a condrita (Nakamura, 1974). **D.** Normalización de REE a manto primitivo (Sun and McDonough, 1989).



## CONCLUSION

El intrusivo de Tushin aflora en la vía Licto a Tushin al norte del granito de Pungalá (UTM 763959E, 9805623N). Corresponde a enjambres de diques anastomosados e irregulares de granitos y granodioritas, de afinidad calco-alkalina a calco-alkalina alta en potasio y su ambiente de formación se vincula a un arco continental. Relaciones de corte con el Granito de Pungalá, sugiere una edad más joven al Eoceno Superior para el intrusivo de Tushin. Este enjambre de diques también podría ser resultado de episodios tardíos del magmatismo eocénico.

## REFERENCIAS

- Aspden, J., & Litherland, M. The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics*, 187-204. (1992).
- Barker, F. Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin. In *Developments in petrology* (Vol. 6, pp. 1-12). Elsevier (1979).
- Chappell, B. W. Two contrasting granite types. *Pacif. Geol.*, 8, 173-174 (1974).
- Guerrero, E. J. Geocronología y Geoquímica de los Intrusivos de Pungalá, Amaluza, San Lucas e Intrusión Porfírica Via Alao., 8-16. (2020).
- Maniar, P. D., & Piccoli, P. M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological society of America bulletin*, 101(5), 635-643 (1989).
- Litherland, M., Aspden, J.A. y Jemielita, R.A. The metamorphic belts of Ecuador. *Nottingham.: Overseas Geology and Mineral Resources*, 11. British Geological Survey, 147. (1994).
- Middlemost, E. A. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-science reviews*, 37(3-4), 215-224. (1994).
- Nakamura, N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. (Vol. 38, pp. 757-775). Elsevier (1974).
- Peccerillo, A., & Taylor, S. R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to mineralogy and petrology*, 58(1), 63-81 (1976).
- Rollison, H. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London (Longman Scientific and Technical). xxvi + 352 pp. (1993).
- Runddle, C. Third annual report (April 1988 – March 1989) of the Cordillera Real Geological Research Project, Ecuador. Potassium-Argon ages for minerals from the Cordillera Real Ecuador. Open-File Report of the British Geological Survey, Keyworth. (1988).
- Sun, S. and McDonough, W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. 316-319. (1989).
- Verma, S. K., Pandarinath, K., & Verma, S. P. Statistical evaluation of tectonomagmatic discrimination diagrams for granitic rocks and proposal of new discriminant-function-based multi-dimensional diagrams for acid rocks. *International Geology Review*, 54(3), 325-347 (2012).

# TÉCNICAS DE INTERROGACIÓN NEUTRÓNICA PARA DETECCIÓN DE SUSTANCIAS PELIGROSAS EN CONTENEDORES PORTUARIOS

Natalia M.B. D'Amico<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento Física de Neutrones, Centro Atómico Bariloche, CNEA, Argentina

e-mail: [ndamico@unrn.edu.ar](mailto:ndamico@unrn.edu.ar)

## RESUMEN

*La detección de sustancias químicas de carácter peligroso, utilizando la radiación como técnica no intrusiva, se considera una herramienta posiblemente favorable para identificar compuestos ocultos en cargamentos. Para ello, y restringiendo el objetivo al sólo efecto de desarrollar una metodología de investigación de la presencia de sustancias de interés, se someterá a prueba un número limitado de sustancias tóxicas para el ambiente con el objeto de probar la posible viabilidad de una técnica de detección en cantidades no inferiores al rango del kilogramo. El interés de identificar la presencia de sustancias tales como cadmio, cloro y mercurio se debe a las restricciones establecidas por la normativa y debido a los numerosos antecedentes de impactos ambientales negativos producto de la incorrecta gestión de las mismas y causantes de innumerables casos de patologías. Se han utilizado diferentes estrategias, a escala laboratorio, a fin de desarrollar una metodología que permita identificar estas sustancias en situaciones desfavorables. Los espectros individuales obtenidos al aplicar la fuente radiactiva con neutrones térmicos y epitérmicos permitieron simular una mezcla homogénea a fin de acercarnos a un caso real de escaneo de contenedores donde se desconoce el fondo. Se aplicaron las regiones de interés seleccionadas para cada muestra estudiada individualmente, las cuales fueron divididas previamente por sus respectivas regiones de referencia. Estos procedimientos de detección buscan generar metodologías que permitan realizar escaneos de porciones del contenedor en tiempos breves a fin de obtener una pronta respuesta. En caso de falla o duda en alguno de los resultados, se cuenta con la información suministrada por otras metodologías, brindando una advertencia en caso de la presencia no declarada de una sustancia química. Este trabajo permite otorgar estrategias que fortalezcan la implementación de herramientas de confirmación para el control transfronterizo de sustancias químicas.*

Palabras Clave: Sustancias, Peligrosas, Neutrones, Metodología.

## INTRODUCCIÓN

El movimiento transfronterizo de sustancias químicas peligrosas ocasiona una gran preocupación a nivel internacional. La descarga clandestina de determinados compuestos en sitios no habilitados para tal fin, genera un impacto negativo significativo en el ambiente y por consiguiente, en la salud de los seres humanos. Entre los compuestos más utilizados en el mercado mundial y que son de sumo interés en esta investigación, se pueden citar las siguientes: mercurio, metal líquido que se evapora rápidamente a temperatura ambiente, el metilato de mercurio es altamente tóxico y por su característica bioacumulativo, se biomagnifica en la cadena trófica; compuestos clorados, altamente tóxicos, persistentes y muy utilizados en plaguicidas y cadmio,

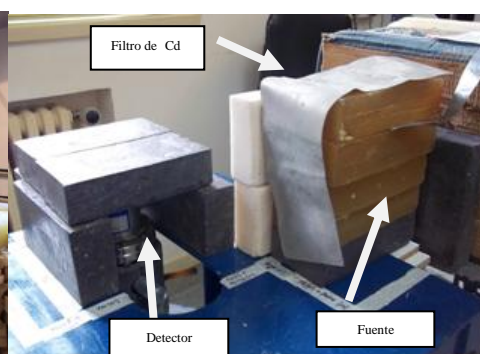
metal que se acumula en los organismos en todos los niveles, no se metaboliza y se transmite sin alteraciones en la cadena alimentaria y es un carcinógeno. En lo que respecta a los convenios firmados internacionalmente, se pueden citar: el Convenio de Basilea donde menciona que “las Partes deberán cooperar en la vigilancia de los efectos del manejo de los desechos peligrosos sobre la salud humana y el medio ambiente”, citando las corrientes Y10, Y43 y Y44 (compuestos clorados), Y26 (cadmio) e Y29 (mercurio).

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

A los efectos de complementar la inspección no intrusiva de mercancías mediante irradiación con fotones X o gamma, se busca identificar las sustancias de interés que componen el cargamento mediante la aplicación de técnicas neutrónicas. En el curso del desarrollo de esta metodología, se realizan diferentes experimentos a los fines de identificar los gammas inmediatos que se obtienen de la reacción  $(n,\gamma)$  inducida por una fuente isotópica de AmBe de  $^{137}\text{Cs}$  Alfa, con vista a la futura aplicación de aceleradores de partículas como fuente de neutrones tecnológicamente viable. En primera instancia, se empleó un acelerador lineal de electrones (LINAC) de 25 MeV (ver Fig. 1) como fuente pulsada de neutrones, con un arreglo de detectores plausible para la detección de la respuesta gamma inducida por los neutrones incidentes sobre la sustancia de transporte peligroso. Posteriormente, se empleó una fuente isotópica de neutrones (AmBe) de  $1,2 \cdot 10^6$  n/s con la cual se realizaron varias pruebas experimentales a los fines de maximizar la relación señal-ruido (ver Fig. 2) y obtener el blindaje adecuado para el personal que trabaja en el sitio. Cabe citar que, la señal proveniente del fondo (Bg) impide observar con nitidez la señal proveniente de la muestra. Para ello, se utilizan diferentes métodos como la selección de regiones de interés (ROI) para poder evaluar más detalladamente el espectro obtenido. Una vez hallados los gammas propios de las muestras irradiadas se probará aplicar el escáner a escala piloto.



**Figura 1.** Fuente: LINAC.



**Figura 2.** Fuente: AmBe.

Las muestras irradiadas fueron las siguientes: mercurio (Hg) líquido: muestra prismática de 50 mm de espesor contenida en un recipiente de vidrio, HgO pro-análisis: tres recipientes comerciales con 100 gramos cada uno, cadmio (Cd): lámina de 0,9 mm de espesor y  $35 \times 11 \text{ cm}^2$  de área, cloro (Cl): forma cloruro de sodio, recipiente comercial prismático de 40 mm de espesor conteniendo 1000 gramos.

Las mediciones se realizaron moderando la energía de los neutrones de la fuente, con parafina y parafina-borada y blindando sus fotones gamma con plomo (dimensiones:

ladrillo completo  $20 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$  y cuarto de ladrillo:  $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ ). Los neutrones epitérmicos se obtuvieron colocando un filtro de cadmio frente al moderador. Estos arreglos permitieron minimizar el ruido proveniente del fondo inducido por la fuente en el ambiente circundante y maximizar la señal de la muestra.

La detección de los gammas provenientes de las muestras fueron realizadas con detectores centelladores de NaI(Tl) en el caso de irradiación con el LINAC y con un detector semiconductor Ge(Li) que posee moderadamente alta resolución en energía, facilitando la identificación de los picos gamma de interés en el caso de la irradiación con la fuente isotópica. Con el detector Ge(Li) los picos gamma característicos de cada muestra pueden observarse con nitidez por lo tanto, se procedió a considerar estos resultados como línea de base para dichos espectros a fin de seleccionar las ROI adecuadas para ser aplicadas en caso de utilizar detectores de baja resolución en energía, donde las líneas gamma no serían evidentes como “picos” en los espectros de una aplicación comercial. Las ROI consideradas son regiones de cada espectro gamma que incluyen un determinado rango de energía, seleccionadas experimentalmente y en concordancia con la bibliografía existente. Por lo tanto, cada elemento químico posee diferentes ROI acorde a los resultados obtenidos en cada espectro. Entre las ROI seleccionadas se encuentra una o varias ROI de referencia (ROIref) propias de cada elemento químico, cuya característica es la ausencia de picos gamma propios de la muestra en el rango de energía que involucre la ROIref.

La metodología aplicada para el cálculo de las ROI consistió en dividir la sumatoria de las cuentas de cada ROI de la muestra por la sumatoria de las cuentas de la ROIref de la misma muestra. El cociente obtenido es comparado con el Bg, al cual se le aplicó el mismo análisis. Posteriormente, se comparan los resultados de la muestra y el Bg, con sus respectivas incertezas estadísticas, verificando que las barras de errores no se solapen, en dicho caso, es factible afirmar que la muestra puede ser detectada debido a la presencia de picos gamma diferentes al Bg. Se busca detectar una discrepancia suficiente entre cada cociente del Bg y el correspondiente de la muestra sin que, en realidad, importe cuál es superior o inferior.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Como ya fue introducido, esta metodología de análisis facilita la detección de los elementos químicos de interés cuando no es posible observar los picos gamma de la muestra debido a la baja detección y/o señal proveniente de la muestra. Por otro lado, a escala real, no es relevante la medición del Bg ya que este varía acorde al sitio de escaneo y la composición del contenido del contenedor, en el cual se busca detectar la presencia de una determinada sustancia. Pero en esta instancia, es de suma importancia poder estudiar si es factible detectar la muestra con un Bg conocido. En cada medición experimental se ha realizado la calibración energía-canal a fin de poder aplicar correctamente y en forma exacta las ROI seleccionadas.

En relación a los tiempos de medición aplicados con la fuente de AmBe fueron entre 86400s y 172000s debido al bajo flujo neutrónico mientras que con el LINAC, se utilizaron tiempos vivos de 300s. Cada medición fue normalizada por el tiempo de medición con el objeto de poder comparar los resultados. El tiempo de medición que se considera aplicar a escala real, a fin de que el diseño sea acorde a la demanda, es de 5

min. Este tiempo fue seleccionado considerando que el LINAC posee el blanco a 6 m de la muestra simulando un acelerador de menor flujo. Cabe citar que el escaneo del contenedor se realiza por franjas, por lo cual cada franja requerirá de 300s. Por lo tanto, solo se considerará la señal gamma cuyos períodos de semidesintegración son del orden de los minutos.

A continuación se presentan las Tablas I, II y III con las energías gamma publicadas por la International Atomic Energy Agency (IAEA), por la Atomic Data and Nuclear Data Tables (ADNDT) y aquellas mencionadas en la Tabla de Segre (TS).

Tabla I. Muestra Cd.

Tabla II. Muestra Cl.

Tabla III. Muestra Hg.

Energía (keV)/Cd	Energía (keV)/Cl	Energía (keV)/Hg
25-88-279,8-716,4-1035,6-1209,4-1294,3-1682,1: ADNDT / 151-245: TS	1642,4-2167,5: TS y ADNDT	70,8-80,2-82,5-158,4-368,1-374,1-413,4: ADNDT
558,6-575,8-651,3-724,9-806-1364,2-1399,3-2455,8-2659,8-5823,9: IAEA	516,73-786,26-788,40-1164,72-1600,82-1950,93-1959,13-2675,96-2863,94-3061,71-4979,94-5715,26-6110,88-6619,53-6627,64-6977,66-7413,80-7790,16: IAEA	661,1-886,6-1225,7-1263-1571,4-1693,9-1719,5-2002,4-2639,5-3185,7-3288,6-4675,4-4739,1-4758,8-4841,8-5049,8-5387,6-5657,7-5966,2-6457,5: IAEA

En las Tablas IV, V y VI se presenta el detalle de las ROI seleccionadas (Mayer et al, 2009).

Tabla IV. ROI-Cd.

Tabla V. ROI-Cl.

Tabla VI. ROI-Hg.

ROI-Cd	Energía (keV)	ROI-Cl	Energía (keV)	ROI-Hg	Energía (keV)
0	48-556	1	47-92	0	79-156
1	557-895	2	93-195	1	157-235
2	896-2335	3	196-410	2	236-597
3	2336-3087	4	411-462	3	598-1150
Ref: 4	3088-4713	5	463-547	4	1151-1698
5	4714-6177	6	548-741	5	1699-1917
Ref: 6	6178-7807	7	742-822	6	1918-2191
Ref: 6.1	6178-6746	8	823-852	7	2192-3236

ROI-Cd	Energía (keV)	ROI-Cl	Energía (keV)	ROI-Hg	Energía (keV)
6.2	6747-7807	9	853-1148	8	3237-4667
7	7808-9301	10	1149-1183	9	4668-5545
-	-	11	1184-1285	10	5546-7055
-	-	12	1286-1830	Ref	7056-8560
-	-	13	1831-1996	-	-
-	-	14	1997-2163	-	-
-	-	15	2164-2646	-	-
-	-	16	2647-3264	-	-
-	-	Ref: 17	3265-4551	-	-
-	-	18	4552-5027	-	-
-	-	19	5028-5468	-	-
-	-	20	5469-6144	-	-
-	-	21	6145-7770	-	-
-	-	22	7771-8193	-	-

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las diferentes muestras a través de los años al irradiar con neutrones térmicos y epitérmicos. Cabe citar que, en el denominador, se detalla la cantidad total de muestras medidas y en el numerador, la cantidad de muestras con respuesta favorable.

En la Tabla VII se resumen los resultados correspondientes a la muestra de Cd, siendo estos muy recomendables.

Tabla VII. Resultados-Cd.

ROI-Cd	2012	2013	2014
0	4/6	3/3	3/3
1-3	6/6	3/3	3/3
4	4/4	2/2	2/2

ROI-Cd	2012	2013	2014
5	6/6	3/3	3/3
6-6.1	4/4	1/2	1/2
6.2	6/6	1/3	1/3
7	0/0	1/3	1/3

En la Tabla VIII se presentan los excelentes resultados obtenidos para la muestra clorada. Cabe recordar que, en el año 2012, las mediciones realizadas contemplan hasta la ROI 22 inclusive, no siendo así para el resto de los años en estudio<sup>1</sup>.

Tabla VIII. Resultados-Cl.

ROI-CI	2012	2013	2014	2015	Resul.
1	2/2	1/6	3/6	1/3	7/17
2	2/2	2/6	2/6	2/3	8/17
3	0/2	3/6	1/6	2/3	6/17
4	2/2	2/6	1/6	2/3	7/17
5	0/2	1/6	1/6	1/3	3/17
6	2/2	1/6	2/6	1/3	6/17
7	2/2	1/6	2/6	0/3	5/17
8	0/2	1/6	2/6	1/3	4/17
9	2/2	2/6	2/6	1/3	7/17
10	2/2	3/6	0/6	1/3	6/17
11	0/2	1/6	2/6	1/3	4/17
12	2/2	1/6	2/6	1/3	6/17
13	0/2	1/6	1/6	1/3	3/17
14	0/2	1/6	2/6	1/3	4/17

<sup>1</sup> En el presente trabajo solo se presentan las mediciones realizadas hasta la ROI 22.

ROI-CI	2012	2013	2014	2015	Resul.
15	1/2	1/6	2/6	1/3	5/17
16	0/2	1/6	0/6	1/3	2/17
17	-	1/4	0/4	1/2	2/10
18	2/2	1/6	4/6	3/3	10/17
19	2/2	3/6	4/6	3/3	12/17
20	2/2	3/6	5/6	3/3	13/17
21	2/2	1/6	4/6	2/3	9/17
22	2/2	0/6	0/6	0/3	2/17

En la Tabla IX se muestran los resultados obtenidos para las muestras de Hg y se puede afirmar que la ROI 9 en primera instancia y posteriormente la ROI 8, permiten identificar la muestra Hg con mayor certeza.

Tabla IX. Resultado-Hg.

ROI-Hg	Hg I	Hg II	Hg líq 17 6 13	Hg líq 25 5 13	HgO 13 8 13	HgO 30 5 13	HgO 15 10 14	Hg líq 22 10 14	HgO 26 3 14	Hg líq 13 2 15	Resul.
0				X		X		X			3/10
1	X	X		X		X					4/10
2	X	X		X	X						4/10
3 y 5	X			X							2/10
4 y 6	X			X	X						3/10
7				X	X	X					3/10
8	X	X		X	X	X					5/10
9	X	X		X	X		X		X	X	7/10
10				X							1/10



Posteriormente se avanzó con el mismo análisis irradiando con neutrones epitérmicos solamente. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla X donde se detalla los resultados parciales (Resul.P.) aplicable a cada ROI, ROIref y el resultado total (Resul.T), siendo la ROIref 6 la recomendable.

Tabla X. Resultado-Cd.

ROI-Cd	ROIref 4	Resul.P.	ROIref 6.1	Resul.P.	ROIref 6	Resul.P.	Resul.T.
0	11/14 - 07/14	2/5	11/14 - 03/15	2/5	11/14 - 03/15	2/5	6/15
1.1	Cd I	1/5	Cd I - 03/15	2/5	11/14 - 03/15	2/5	5/15
1.2	11/14	1/5	03/15	1/5	Cd II - 11/14 - 03/15	3/5	5/15
2	11/14	1/5	11/14 - 03/15	2/5	11/14 - 03/15	2/5	5/15
3		0/5	03/15	1/5	11/14 - 03/15	2/5	3/15
4	-	-	03/15	1/5	11/14 - 03/15	2/5	3/10
5		0/4	11/14 - 03/15	2/5	11/14 - 03/15	2/5	4/14
6	11/14	1/4		0/5	-	-	1/9
6.1	11/14	1/4	-	-		0/5	1/9
6.2	11/14	1/4	Cd I	1/5		0/5	2/14
7	11/14	1/4		0/5		0/5	1/14

En la Tabla XI se presenta un resultado parcial (Res.P.) utilizando solamente la ROIref 17, recalando que la misma pudo aplicarse a todas las muestras estudiadas. De los resultados observados se afirma que la ROIref 17 es recomendable para poder detectar la muestra de interés y las ROI 2 y 3 poseen una excelente respuesta gamma proveniente de la muestra.

Tabla XI. Resultado-CI.

Ref.	3265-4551 keV						8194-8839 keV			
	ROI	CI I	CI II	CI III	24/7/14	29/7/14	20/1/15	Res.P.	20/1/15	Res.T.
1					X	X	X	3/6		3/8
2-3	X	X	X		X	X	X	6/6		6/8

ROI	CI I	CI II	CI III	24/7/14	29/7/14	20/1/15	Res.P.	20/1/15	Res.T.
4				X	X	X	3/6		3/8
5				X			1/6		1/8
6			X				1/6		1/8
7-16							0/6		0/8
17	-	-	-	-	-	-	-		0/2
18				-	-		0/4		0/6
19	X		X	-	-		2/4		2/6
20-22	X	X	X	-	-		3/4		3/6
23	X	X	X	-	-		3/4	-	3/5

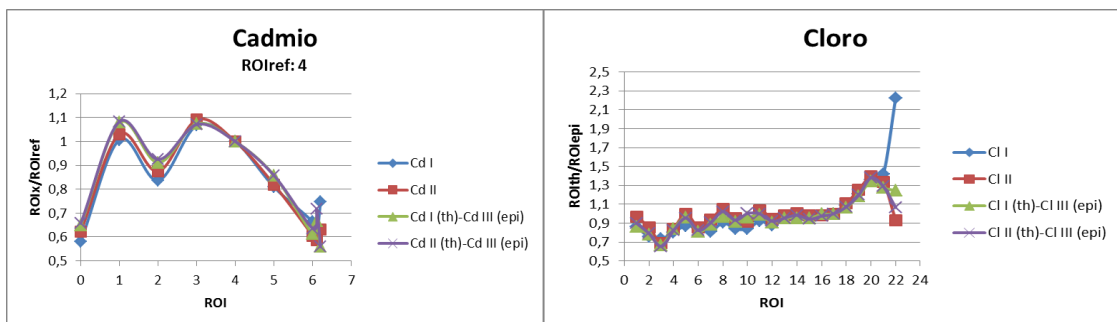
En la Tabla XII se sintetizan los resultados obtenidos para el Hg, considerando solo la ROIref: 7056-8560 keV a fin de que los resultados sean comparativos. Se concluye que las ROI 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 poseen respuesta gamma en el rango epitérmico.

Tabla XII. Resultado-Hg.

ROI	Hg I	Hg II	Hg III	Hg líq 27/11/14	Hg líq 20/11/14	Hg líq 6/3/15	Hg líq 5/3/15	Hg líq 10/3/15	HgO 8/1/15	Resul.
0		X								1/9
1		X						X		2/9
2-9		X				X	X	X		4/9
10										0/9
11						X	X	X		3/6

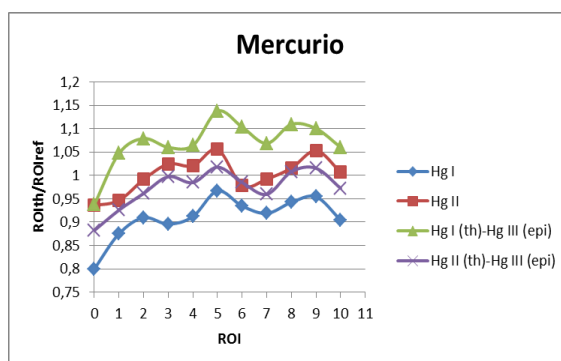
En esta instancia se procedió a realizar un nuevo análisis a fin de identificar otras prescripciones que permitan identificar las muestras de interés. Este análisis se aplicó solo a los resultados obtenidos con el LINAC, considerando que un acelerador es lo recomendable para ser utilizado a escala real en caso de un escaneo. Las ROI seleccionadas para cada muestra fueron divididas previamente por sus respectivas ROIref, las cuales se especifican en las Fig. 3, 4 y 5. Posteriormente, los resultados obtenidos, en ambos rangos de energía, se dividen entre sí ( $ROI_{th_x}/ROI_{epi_x}$ ).

Aplicando los pasos detallados anteriormente, se obtienen diferentes “formas” propias de cada muestra. En el caso del Cd, se observa una “doble loma” (ver Fig. 3) en cambio, el Cl posee una “pendiente positiva al inicio con una loma importante y puntiaguda al final” (ver Fig. 4). El Hg posee “tres lomas” (ver Fig. 5). Cabe citar que, en el caso de la muestra Cl I, las mediciones no responden a la tendencia mayoritaria de las curvas que otorgan la “forma” del elemento químico; en dicho caso se observa un apartamiento espurio.



**Figura 3.** Muestra de Cd.

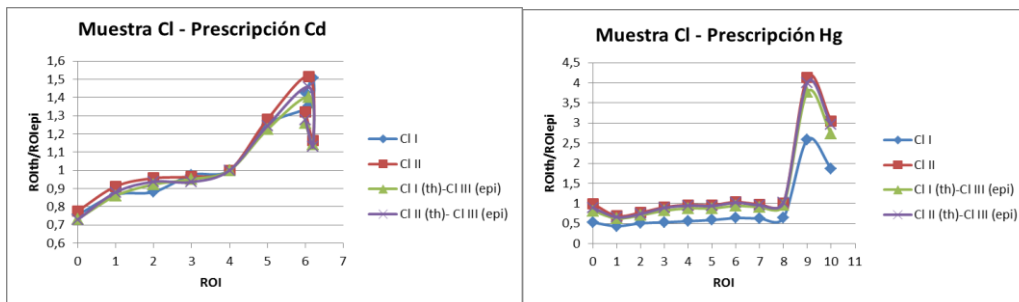
**Figura 4.** Muestra de Cl.



**Figura 5.** Muestra de Hg.

A fin de verificar si este procedimiento es fidedigno para ser aplicado en la detección de estas sustancias químicas, se tomaron las cuentas originales obtenidas en las mediciones con el LINAC y se aplicó la prescripción de otra sustancia química, como por ejemplo, las cuentas del Cd fueron analizadas como si fueran Cl, es decir, las cuentas del Cd se dividieron en los rangos de energías (ROI) establecidos para el Cl aplicando la ROIref propia del este último elemento químico. Este análisis se repitió para las cuentas obtenidas en ambos rangos de energía del neutrón. El resultado que se espera no obtener es la “forma” propia del Cl dado que, las cuentas utilizadas pertenecen al Cd. Si es posible alcanzar esta respuesta, el procedimiento es apto para descartar sustancias químicas en caso de duda. En los casos que se presentan a continuación, las señales espurias fueron eliminadas de las Figuras debido a que se tratan de mediciones fallidas.

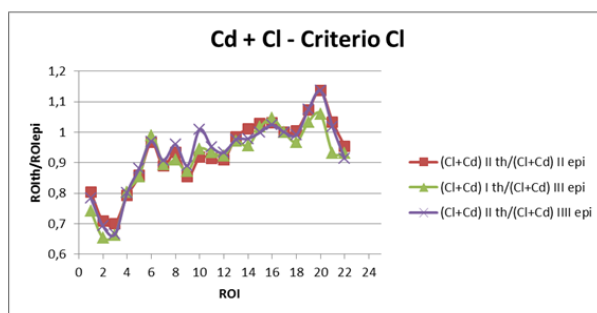
En las Fig. 6 y 7 se aplican la prescripción del Cd y del Hg a la muestra de Cl, sin obtener las “formas” de dichos elementos químicos, indicando que es posible identificar la no presencia de un determinado compuesto.



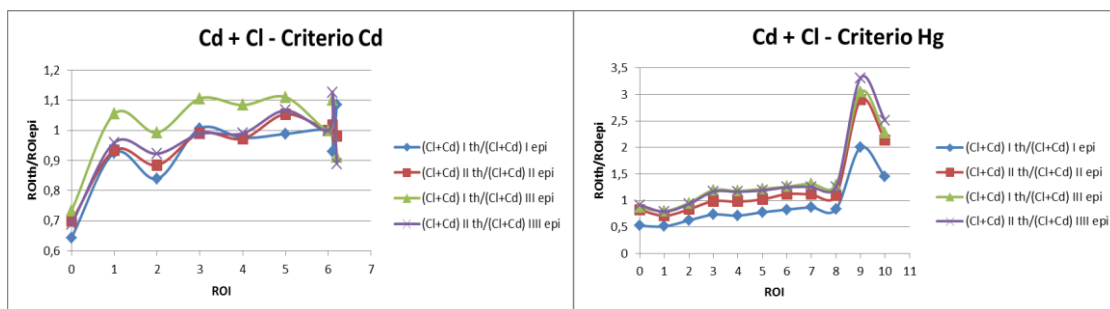
**Figura 6.** Prescripción Cd - Muestra de CI.

**Figura 7.** Prescripción Hg - Muestra CI.

En las Fig. 8 y 9 se presentan los resultados obtenidos al mezclar Cd+CI, aplicando el criterio de ROI del CI y Cd respectivamente y obteniendo resultados favorables al comparar los gráficos con las Fig. 3 y 4. En la Fig. 10 se presenta la misma mezcla y se aplica el criterio del Hg, obteniendo que no se detecta el Hg (ver Fig. 5) siendo la estrategia planteada favorable.



**Figura 8.** Mezcla Cd+CI / Criterio CI



**Figura 9.** Mezcla Cd+CI / Criterio Cd.

**Figura 10.** Mezcla Cd+CI / Criterio Hg.

## CONCLUSIONES

Un aspecto relevante a observar es la resolución en energía de los detectores que se utilizarán a escala real y aquellos utilizados en los experimentos presentados en el presente trabajo. El detector semiconductor Ge(Li) aquí empleado, o los muy superiores HPGe existentes en el mercado, poseen una elevada resolución en energía pero operativamente resultan poco convenientes debido al requerimiento de refrigeración continua con nitrógeno líquido o refrigeradores eléctricos, la dificultad para manipularlos debido al tamaño y peso y los elevados costos. Los detectores

centelladores de NaI(Tl) son más económicos, más fáciles de manipular pero poseen una resolución en energía menor a los detectores semiconductores.

En relación al flujo de neutrones adecuado: la fuente de AmBe permite observar la nitidez de la señal gamma proveniente de la muestra y es útil para avanzar con los experimentos y definir las ROI que deben analizarse en caso de un escaneo real. Los aceleradores pulsados permiten analizar detalladamente la reacción  $(n,\gamma)$  en el tiempo que transcurre entre pulsos siendo una ventaja de operarse sólo cuando es requerido.

Los elementos químicos estudiados fueron motivados por el carácter tóxico que presentan para el ambiente y la salud de los seres humanos. El Cd presenta una respuesta gamma significativa especialmente con neutrones térmicos debido a la elevada sección eficaz del compuesto para neutrones de baja energía y respuestas favorables obtenidas al irradiar con neutrones en el rango epitérmico. El Cl posee una elevada sección eficaz para neutrones térmicos por ello, era esperable obtener una respuesta gamma significativa con neutrones térmicos y los resultados obtenidos con neutrones epitérmicos no son suficientemente significativos por sí pero cubren distintos rangos de energía brindando información complementaria para confirmar la detección de la sustancia. En el caso del Hg se requirió una mayor dedicación y atención debido a la poca señal gamma que se obtenía de la muestra al ser irradiada por distintos rangos de energías del neutrón. El Hg líquido genera auto-apatallamiento de la señal gamma ( $Z=80$ ) mientras que el HgO, al presentar un contenido de Hg algo más “diluido”, permite detectar la señal con mayor facilidad y en el rango epitérmico, la respuesta gamma fue excelente mientras que, los resultados obtenidos en los otros rangos de energía se consideran un complemento.

Los resultados más satisfactorios fueron aquellos alcanzados con los cocientes que involucran las sumatorias de las ROI obtenidas, mediante el LINAC,  $(ROI_{th}/ROI_{epi})$ . En la mezcla homogénea de sustancias, los resultados obtenidos también fueron muy favorables al analizar la presencia y/o la ausencia de los compuestos que integraban la mezcla.

Dado el espesor de 2,40 m de los grandes contenedores aduaneros sugieren la muy probable necesidad de realizar la revisión del cargamento, simultánea o alternativamente, desde ambos lados del mismo. El desarrollo de este trabajo busca encontrar procedimientos que puedan resultar aptos para aplicar un futuro sistema experto para proveer a las aduanas mecanismos automáticos que fortalezcan la implementación de herramientas de confirmación para el control transfronterizo de sustancias químicas peligrosas.

## REFERENCIAS

Mayer, R. E., A. Tartaglione, J. J. Blostein, C. Sepúlveda Soza, M. Schneebeli, P. D'Avanzo, L. Capararo. *Slow neutron interrogation for detection of concealed substances. Third Research Coordination Meeting on Neutron Based Techniques for the Detection of Illicit Materials and Explosives, United Nations Internat. Atomic Energy Agency (IAEA) Coordinated Research Project. Johannesburg, South Africa, 16-20 November 2009.*

# ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO CTALAMOCHITA, CÓRDOBA, ARGENTINA.

Lucía de Antueno<sup>a</sup> y Fernanda J. Gaspari<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAYF. Universidad Nacional de La Plata. ARGENTINA.

e-mail: [lucia.deantueno@agro.unlp.edu.ar](mailto:lucia.deantueno@agro.unlp.edu.ar)

## RESUMEN

*En este trabajo se analiza la producción de sedimentos generados por erosión hídrica superficial en la cuenca el río Ctalamochita, tributario del río Carcarañá, que desemboca sus aguas en el río Paraná, Argentina. Para ello se ha aplicado la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) con información del territorio en formato ráster, abordando el estudio en un sistema de información geográfica. La USLE comprende los conceptos universalmente conocidos de los agentes generadores de erosión tales como el potencial erosivo de las gotas de lluvia, los componentes topográficos como la longitud y grado de pendiente, además la textura del suelo erodado, el uso/cobertura y prácticas de conservación del suelo. Esta ecuación, evalúa principalmente la erosión laminar y en surcos en forma conjunta, su bondad depende del rigor con que los factores que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos. La cuenca alta del río Ctalamochita tiene gran potencialidad en la generación de sedimentos dadas las amplias superficies con elevadas pendientes asociadas a una densa cobertura vegetal y la predominancia de una morfología que permite la rápida concentración del agua precipitada. Mientras que, en la parte baja, se exhibe una drástica disminución en las pendientes, asimilando el comportamiento hidrológico de la zona con un sistema de llanura, favoreciendo la deposición de los sedimentos generados en áreas actualmente ocupadas por las urbanizaciones creadas sin planificación del territorio. Un 37,4% de la superficie en la cuenca presenta niveles bajos de erosión, con valores menores a 5 Mg/ha.año, mientras que se encuentra sometida a procesos moderados de erosión, entre 5 y 10,0 Mg/ha.año, el 31,1% de la cuenca. Finalmente, el 31,6% presenta valores elevados de erosión hídrica superficial.*

*Palabras Clave: Uso del territorio, SIG, Erosión hídrica superficial*

## INTRODUCCION

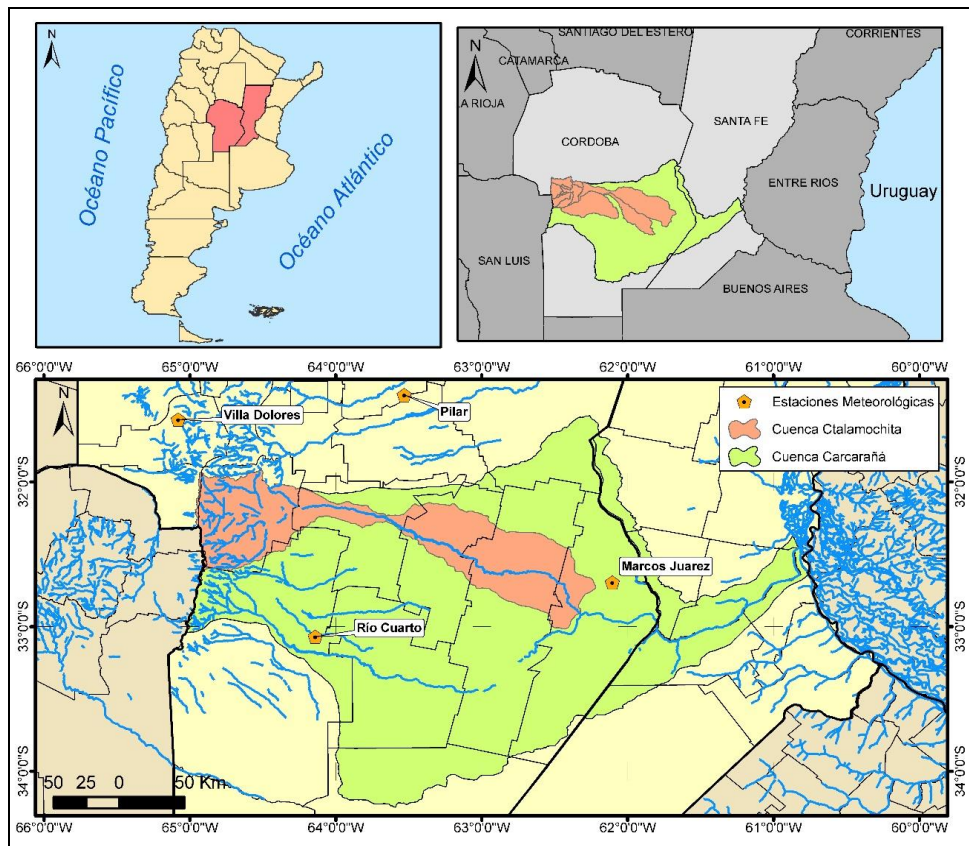
La erosión del suelo se entiende como un proceso de degradación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos. Cuando dichos agentes son dinámicos, como la lluvia, a través del impacto de las gotas sobre la superficie, y el escurrimiento superficial, el suelo está expuesto a procesos de erosión hídrica (Ellison, 1947).

La capacidad potencial que presenta un suelo para hacer frente a los procesos de erosión hídrica, está determinada por factores predisponentes, los cuales pueden ser analizados y cuantificados por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE), que es un modelo matemático de tipo paramétrico que permite estimar cuantitativamente la erosión para determinadas condiciones de precipitación, suelo, relieve, cultivo y prácticas de manejo (Villanueva y Osinaga, 2004).

Dentro del manejo de las cuencas hidrográficas, es de particular importancia identificar áreas de alto riesgo de Erosión Hídrica. En el presente trabajo se analiza la producción de sedimentos generados por erosión hídrica superficial en la cuenca el río Ctalamochita, tributario del río Carcarañá, que desemboca sus aguas en el río Paraná, Argentina. Para ello se ha aplicado la USLE con información del territorio en formato ráster, abordando el estudio en un sistema de información geográfica.

### ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca en estudio corresponde al área de aporte del río Ctalamochita ubicada en el sector central de la provincia de Córdoba, tributaria del río Carcarañá (Figura 1). La misma ocupa de 10.573 km<sup>2</sup> de extensión, se encuentra en la zona centro sudeste de la provincia de Córdoba.



**Figura 1.** Ubicación de la cuenca del río Ctalamochita en la cuenca del río Carcarañá. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Presenta un clima templado subhúmedo a húmedo, cuya precipitación media anual varían entre 700 mm a 900 mm, disminuyendo hacia el oeste, pero aumentando nuevamente en el Valle de Calamuchita a 900 mm, siendo los meses de mayores lluvias entre noviembre a abril. La temperatura media anual oscila entre los 17° C a los 19 °C de Este a Oeste (UNVM., 2015). En el verano, la temperatura media oscila entre los 23 °C en el sur de la provincia, hasta 26 °C en el extremo NO. En el invierno, el área SO de la provincia es la que presenta temperaturas más bajas, con valores del orden de los 8 °C, ascendiendo a los 11,5 °C en la zona norte (Bahill et al, 2006).

El principal uso de suelo es agrícola-ganadero, tanto en la región pedemontana de cuenca alta como en la región de llanura de la cuenca media y baja, siendo el primordial

desarrollo socioeconómico, acentuándose más en las pequeñas poblaciones y las zonas rurales. En la cuenca alta, el uso de suelo en el Valle de Calamuchita es principalmente la forestación de pinos, así como también la ganadería. Sin embargo, el principal desarrollo socioeconómico de la región montañosa es el turismo, en este marco la actividad minera está restringida (UNVM, 2015).

En la parte alta de la cuenca hay dos sistemas hidroeléctricos que brindan el suministro de energía, el complejo Río Grande conformado por los embalses Cerro Pelado y Arroyo Corto y el sistema Río Tercero, constituido por los embalses Río Tercero, Ing. Cassaffouth, Ing. Benjamín Reolín y Piedras Moras (Díaz Lozada et al, 2015).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La USLE, desarrollado por Wischmeier y Smith en 1978, representa un modelo que estima la pérdida promedio anual de suelo en tierras agrícolas. Requiere datos de precipitación, suelo, pendiente del terreno y del uso y manejo del suelo. Es un modelo que depende de la erosividad de las precipitaciones, de la erodabilidad del suelo y de las consecuencias del uso del mismo (Gaspari, et al. 2013).

Esta ecuación, evalúa principalmente la erosión laminar o erosión “entre surcos” y la erosión en surcos en forma conjunta, no así a la erosión por escurrimiento o “flujo concentrado”, cuya expresión máxima es la formación de cárcavas (Marelli, 1988, citado por Gaitán, 2017). Su bondad depende del rigor con que los factores que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio al interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos (Almorox et al, 1994).

La zonificación USLE en la cuenca del río Citalamochita se realizó por medio del procesamiento geoespacial de la ecuación empleando el software ArcMap 10.1. La ecuación USLE para pérdida de suelo se expresa a continuación:

$$A=R.K.LS.C.P \quad (1)$$

Donde,

A: Es la pérdida de suelo por erosión pluvial (Mg.ha-1.año-1)

R: Es el factor que indica la erosión pluvial o erodabilidad del aguacero (J.cm.m-2.h-1). Se emplearon valores de R obtenidos por recolección de antecedentes reflejados en la bibliografía. Finalmente, con una variación espacial determinada se zonificó empleando el software ArcMap 10.1.

K: es el factor de la erodabilidad del suelo (Mg.m2.h.ha-1.J-1.cm-1). Se empleó para su determinación la ecuación simplificada, con los datos de los distintos tipos de suelos de la cuenca, donde fueron considerados los datos granulométricos y la distribución de los mismos por medio de cartografía y procesamiento geoespacial con sistema de información geográfica

$$K_{Simplificado} = 10^{-6} . 2,71 . M^{1,14} . (12 - a) \quad (2)$$

Siendo,

M = (% limo + % arena muy fina) x (100 - % arcilla)

a: Porcentaje de materia orgánica



El factor LS en la ecuación de predicción de la pérdida de suelo, representa las toneladas de pérdida de suelo por hectárea por unidad de índice de erosión pluvial para una pendiente de 9 % y una longitud de 22,1 metros. Este factor expresa la pérdida en barbecho continuo sin la influencia de cubierta vegetal o de ordenación alguna (Rojas y Conde, 1985). La cantidad de suelo erodado aumenta a medida que aumenta el grado y la longitud de la pendiente (Henaó, 1988, citado por Rojas y Conde, 1985).

L: es el factor longitud de pendiente, expresa la relación de pérdida de suelo de una pendiente con una longitud dada y la pérdida de suelo de una pendiente con una longitud estándar de 22,13 m, con idénticos valores de erodabilidad y gradiente de pendiente. Se calculó empleando SIG, mediante las siguientes ecuaciones:

$$L = \left( \frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad m = \frac{F}{(1+F)} \quad F = \frac{\sin \beta / 0,0896}{3(\sin \beta)^{0,8} + 0,56}$$

Donde,  $\lambda$ : es la longitud de la pendiente (en metros), definida como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o donde la escorrentía fluye a un canal definido (Barrios y Quiñonez, 2000); m es el exponente de la longitud de la pendiente;  $\beta$  es el ángulo de la pendiente.

S: El factor de gradiente de pendientes expresa la relación de pérdida de suelo de un gradiente de pendiente específica y la pérdida de suelos de una pendiente con gradiente estándar de 9 %, bajo otras condiciones similares, de esta manera define el efecto de la inclinación de la pendiente sobre la pérdida de suelo por unidad de área. Se determinó mediante el uso de SIG, empleando las siguientes ecuaciones condicionales:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10,8 \sin \beta_{(i,j)} + 0,03 & \tan \beta_{(i,j)} < 0,09 \\ 16,8 \sin \beta_{(i,j)} - 0,5 & \tan \beta_{(i,j)} \geq 0,09 \end{cases}$$

Donde  $\beta$  es el ángulo medio a todos los subgrids (sectores en que se divide ráster para su análisis) en la dirección de mayor pendiente (Barrios y Quiñonez, 2000).

En este caso, el factor LS se determinó empleando el software ArcMap 10.4 a partir del DEM de la cuenca. Los pasos fueron: primero se realizó un filtro de paso bajo para suavizar los datos al reducir la variación local y quitar el ruido. Luego se realizó una interpolación bilineal, para trabajar con píxeles de tamaño mayor. Finalmente se empleó la herramienta rellenar para evitar errores de sumideros y picos debido a la resolución de los datos o el redondeo de elevaciones al valor entero más cercano. Luego se obtuvo el mapa de pendientes en porcentaje y se emplearon las ecuaciones descritas para determinar el factor LS para cada punto de la cuenca.

C: es el factor de ordenación de cultivos. Se obtuvo de tablas, en función de la cubierta vegetal que se encuentre en cada caso. A partir del mapa de vegetación, con tipos de cobertura, se determinaron los valores de los factores C.

P: es el factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo, fue considerado igual a la unidad en todos los casos, ya que no se halla una tendencia marcada en el manejo de los suelos, ni prácticas de conservación a la escala de detalle de este trabajo.

Los resultados obtenidos de pérdida de suelo fueron comparados con los valores de la Tabla 1 elaborada por FAO, PNUMA y UNESCO (1980) para la clasificación del grado de erosión hídrica superficial, representando el grado de razonabilidad de cada área.

**Tabla 1.** Clasificación del grado de erosión hídrica superficial

Perdida de suelo (Tn/ha año)	Grado de erosión hídrico
< 10	Nulo o Leve
10 - 50	Moderado
50 - 200	Alto
> 200	Muy Alto

Según Gaspari et al., 2013, esta clasificación considera:

Nulo o leve: cuando no hay presencia de erosión hídrica superficial o sólo se adelgaza el horizonte A o capa arable, observándose casi en su totalidad (menos del 25% del espesor).

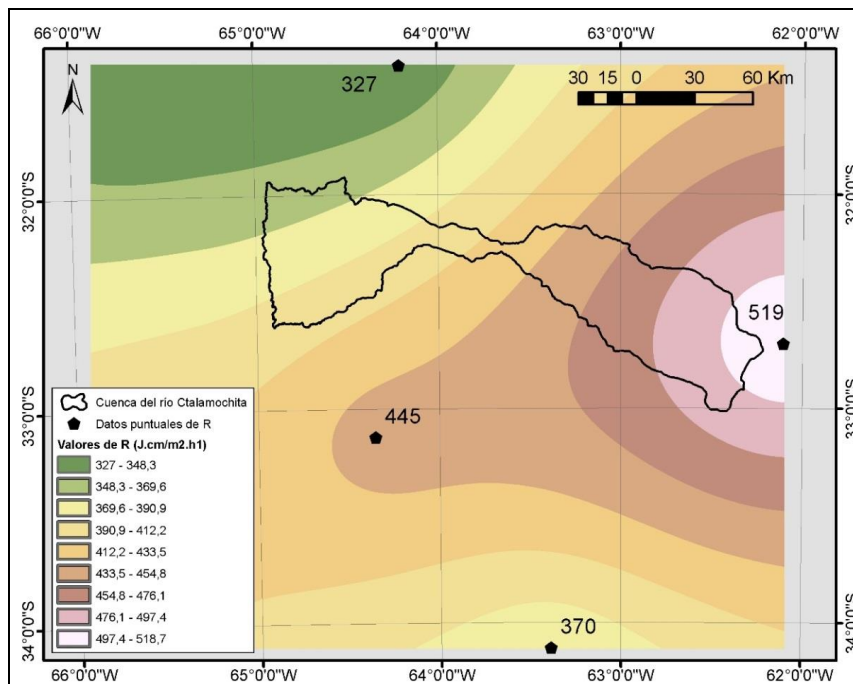
Moderado: Poca formación de surquillos. El horizonte A ha sido arrastrado en parte (entre 25% y 75%). Algunas áreas pueden tener patrones intrincados que varían de manchas pequeñas a sitios erodados, donde el horizonte original A ha sido removido.

Alto: El arrastre del horizonte A es severo, casi total (más del 75%). Frecuentemente ocurre formación de surcos y en ocasiones se presentan cárcavas aisladas.

Muy alto: Pérdida completa del horizonte A, en forma muy severa. Se presenta formación de cárcavas en una red densa. Los suelos han sido destruidos casi totalmente, excepto en las pequeñas áreas que quedan entre cárcava y cárcava.

## RESULTADOS

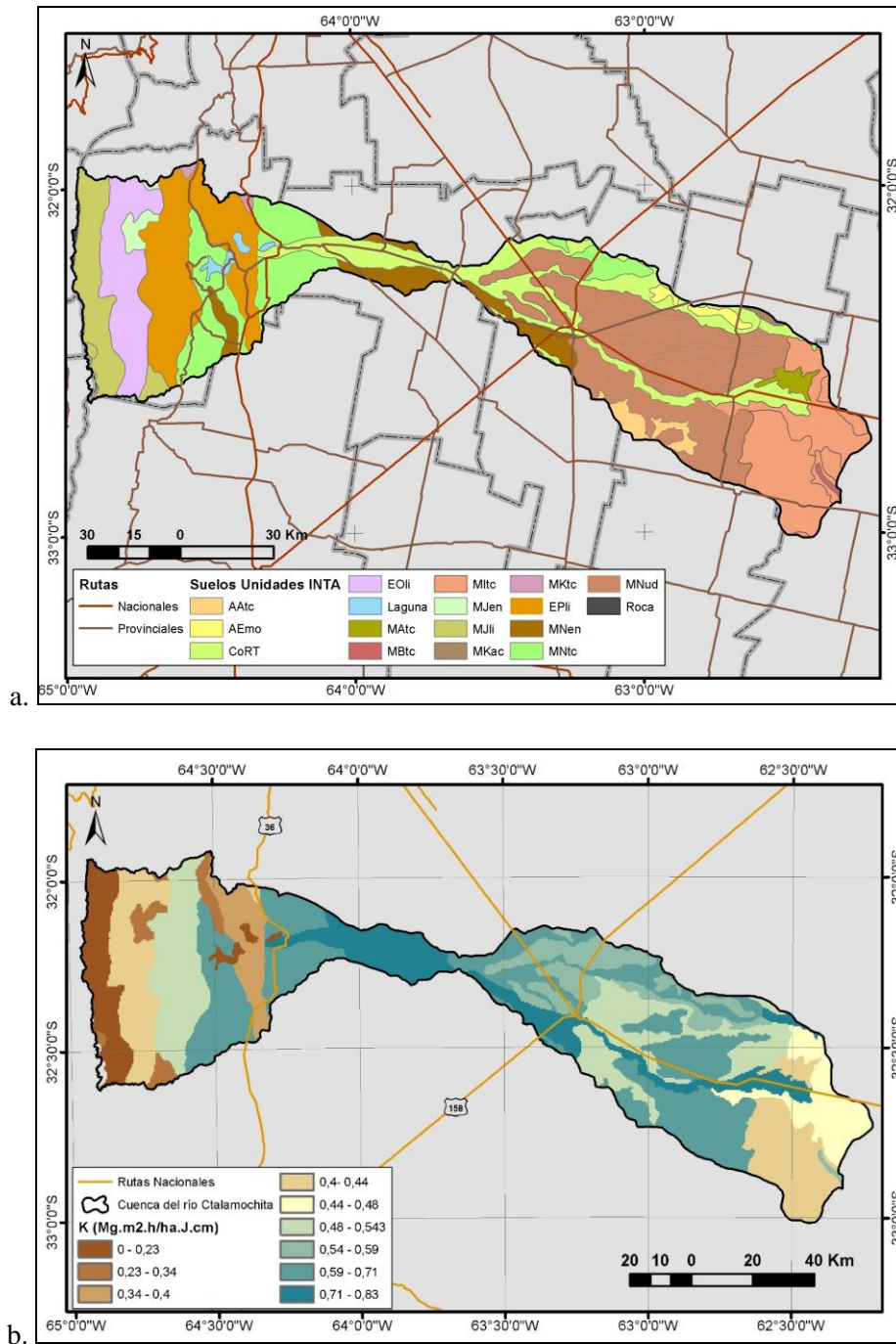
Para la determinación del factor R (ver Figura 2) se consideraron los valores que presentaron Rojas y Conde, 1985, para cuatro localidades de la provincia de Córdoba: en Marcos Juárez, 519, en Laboulaye, 370, en Córdoba, 327, y en Río Cuarto, 445.



**Figura 2.** Valores del Factor R en la cuenca. Fuente: De Antueno, L. 2019.

A partir de estos datos se interpolaron dichos valores y se establecieron las isocorodetas, que se presenta en la Figura 2, donde se evidencia un aumento local de los valores desde el ONO hacia el ESE, coincidente con los autores mencionados anteriormente.

Luego se analizaron los suelos de la cuenca, Figura 3.a., donde a escala regional se observa un bajo porcentaje de desarrollo de suelos en la región montañosa limitado principalmente por la alta escorrentía y baja retención del agua en el material originario, la cual es principalmente destinada a la recarga del acuífero fracturado en cuenca alta.

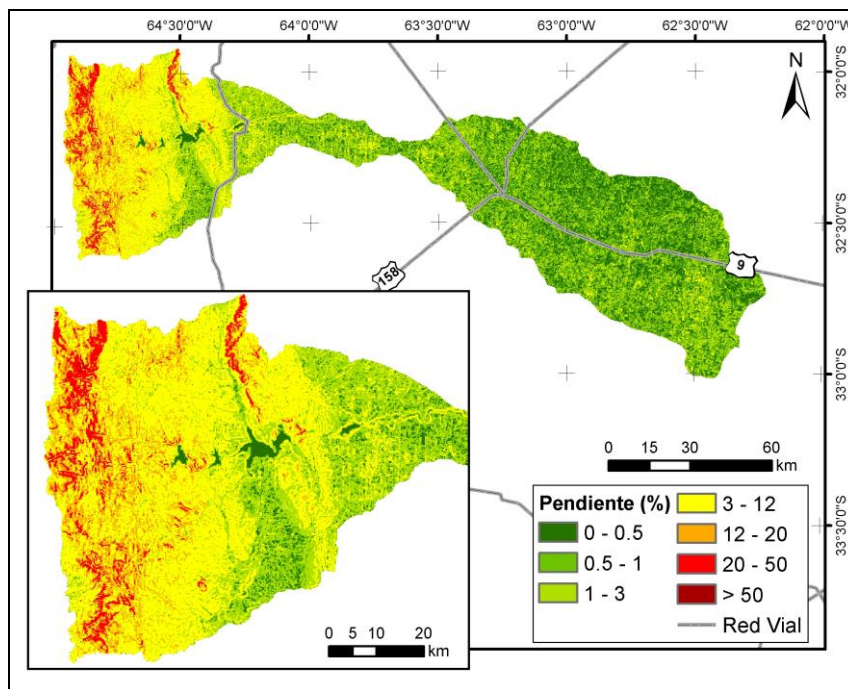


**Figura 3. a.** unidades de suelos. Datos INTA, Bahill et al., 2006. **b.** Valores del Factor K calculados. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Mientras que, en la planicie fluvio-eólica se diferencian bien dos sectores relacionados al basculamiento diferencial de los bloques por la neotectónica con buen desarrollo de los suelos, pero con ciertas limitantes como baja retención de humedad y climática en el sector de Pampa elevada y anegamiento en el sector de la Pampa hundida con intensificación de las problemáticas de salinidad. El acuífero en la planicie es poroso, quedando expuesta la freática en algunos sectores de lagunas, cañadas y bañados de la Pampa hundida.

A partir de los datos de granulometría y la cantidad de materia orgánica de los distintos tipos de suelo presentes en la cuenca, obtenidos para cada una de las unidades cartográficas, se determinó el factor K, de la erodabilidad del suelo, Figura 3.b. Los menores valores de K se encuentran en los sectores donde el suelo presenta un menor desarrollo, un menor espesor, especialmente en la zona serrana de la cuenca alta. Mientras que, en la cuenca media y baja, donde los contenidos de materia orgánica son mayores, los valores de K aumentan considerablemente.

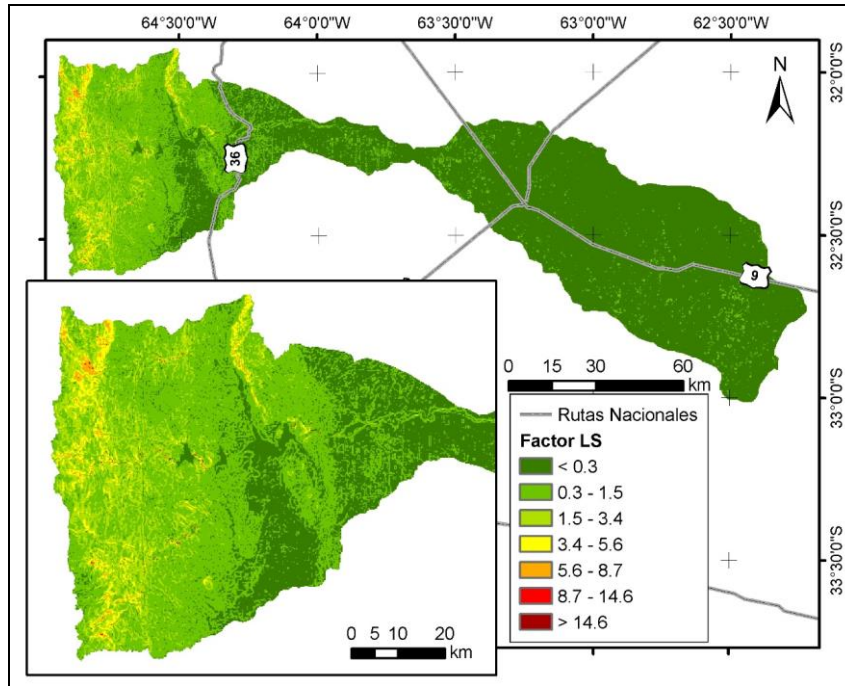
En cuanto a la longitud (L) y la pendiente del declive (S), en principio se desarrolló el mapa de pendientes, Figura 4, donde se evidencia una predominancia de pendientes menores al 3 % en la parte baja de la cuenca siendo, un relieve mayoritariamente plano con presencia de lomadas. Mientras que, en la parte alta de cuenca, presenta pendientes mayores al 12 %, alcanzando picos mayores al 20 % especialmente en la grandes cañadas y valles, definiéndose como relieves accidentados y con fuertes pendientes.



**Figura 4.** Mapa de pendientes, en porcentaje. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Luego se aplicaron las ecuaciones de la longitud (L) y de la pendiente del declive (S), obtenido los valores presentados en la Figura 5, donde se observan los máximos valores

de LS en concordancia con las mayores pendientes de la parte alta de la cuenca y especialmente en la zona de cañadas y valles.



**Figura 5.** Valores del Factor LS en rangos. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Para determinar los valores de C, se analizaron los distintos usos de suelo y coberturas presentes en la cuenca, Figura 6. En función de tablas, se determinaron los factores C de ordenación de los cultivos, a partir de la interpretación los datos de cobertura y uso del suelo presentados en la Tabla 2.

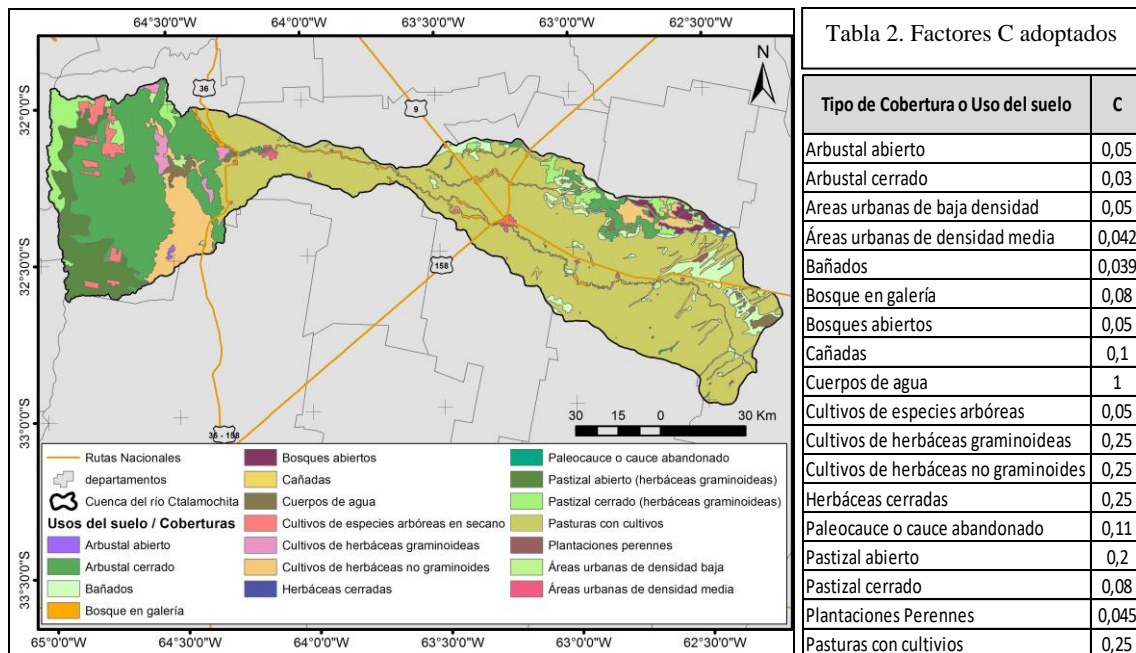
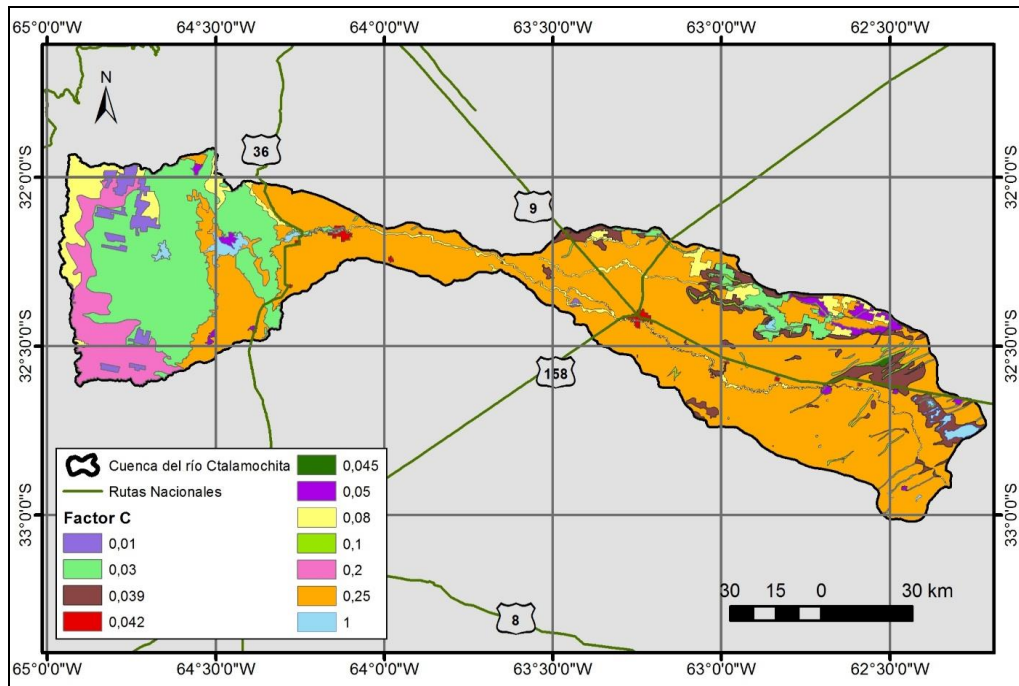


Tabla 2. Factores C adoptados

Tipo de Cobertura o Uso del suelo	C
Arbustal abierto	0,05
Arbustal cerrado	0,03
Áreas urbanas de baja densidad	0,05
Áreas urbanas de densidad media	0,042
Bañados	0,039
Bosque en galería	0,08
Bosques abiertos	0,05
Cañadas	0,1
Cuerpos de agua	1
Cultivos de especies arbóreas	0,05
Cultivos de herbáceas graminoideas	0,25
Cultivos de herbáceas no graminoideas	0,25
Herbáceas cerradas	0,25
Paleocauce o cauce abandonado	0,11
Pastizal abierto	0,2
Pastizal cerrado	0,08
Plantaciones Perennes	0,045
Pasturas con cultivos	0,25

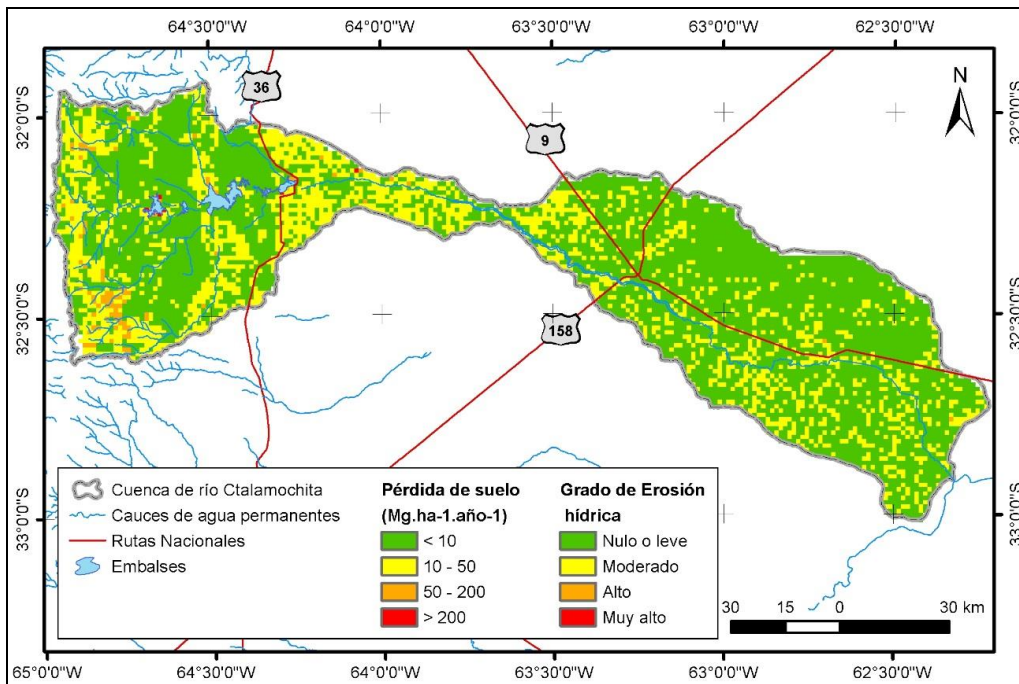
**Figura 6.** Mapa de uso de suelo y coberturas, datos: IGN y FAO. Fuente: De Antueno, L. 2019.

La Figura 7 presenta la distribución de los valores adoptados para el factor C, según los tipos de coberturas existentes en la cuenca.



**Figura 7.** Valores del Factor C en la cuenca. Fuente: De Antueno, L. 2019

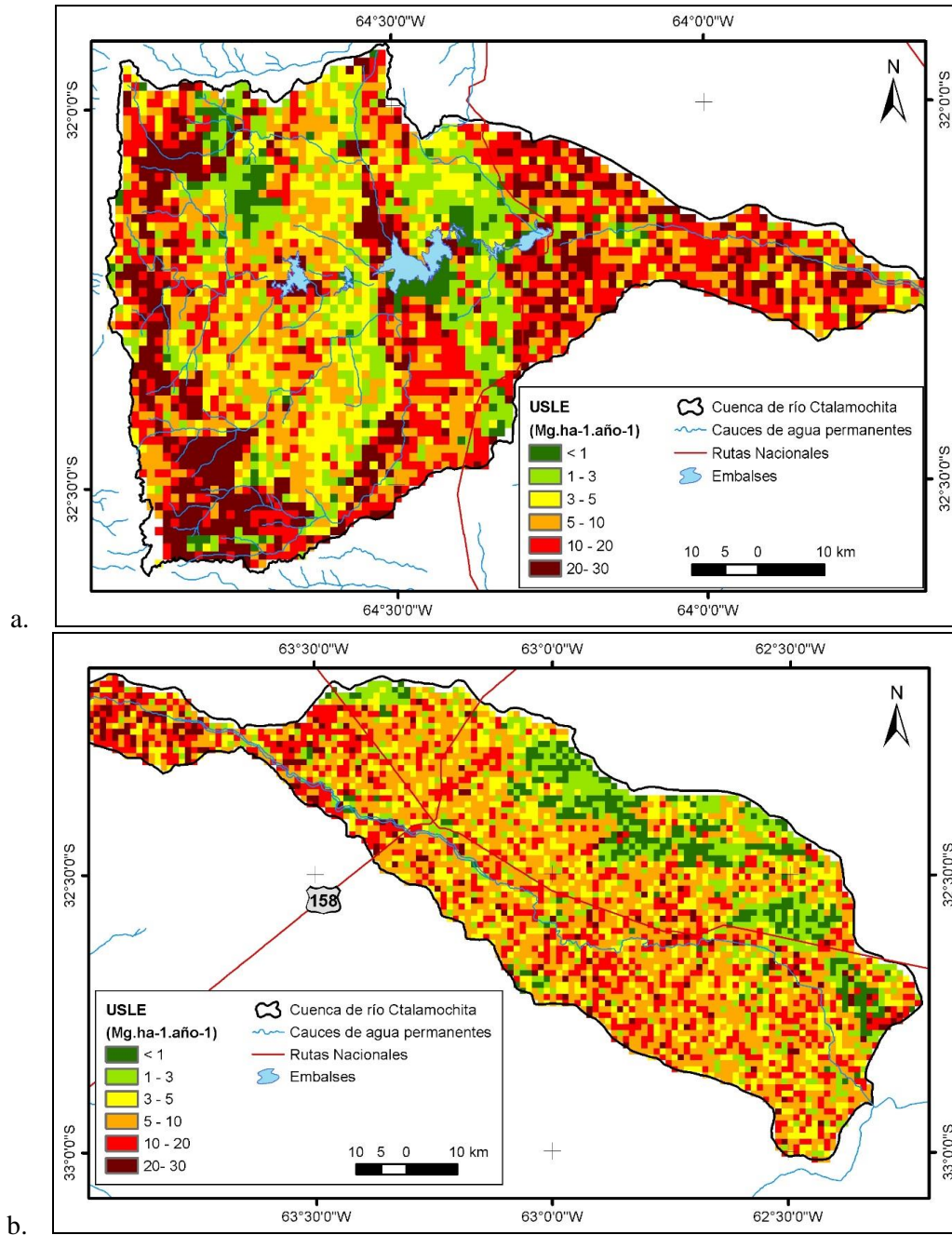
Finalmente, aplicando la ecuación USLE, a partir de la superposición de mapas ráster, con el uso de software ArcMap 10.4 se obtuvo la distribución de la pérdida de suelo en la cuenca, los valores reclasificados según los rangos de FAO obtenidos se presentan en la Figura 8.



**Figura 8.** Pérdida de suelo por erosión hídrica, USLE. Fuente: De Antueno, L. 2019.

Se diferencia el grado de erosión hídrica, siendo levemente mayor en la parte media de la cuenca, donde las pendientes son importantes y las coberturas del suelo mínimas, mientras que en la parte alta la presencia de arbustales y pastizales hacen que la erosión sea moderada a alta. Aun habiendo pendientes pronunciadas, sólo algunos puntos presentan valores calificados con un grado de erosión muy alto.

Dado que gran parte de la superficie de la cuenca se encuentra en el rango *Moderado*, con una pérdida de suelo entre 10 y 50  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , se planteó un rango más discretizado, presentando en la Figura 9.



**Figura 9.** Pérdida de suelo por erosión hídrica, USLE. **a.** cuenca alta. **b.** cuenca media-baja. Fuente: De Antueno, L. 2019.

En Gaspari et al., 2013, citando a Morgan, 1997, se define la pérdida de suelo superficial tolerable como la tasa máxima de erosión permisible para que la fertilidad del suelo pueda mantenerse durante 20 o 25 años.

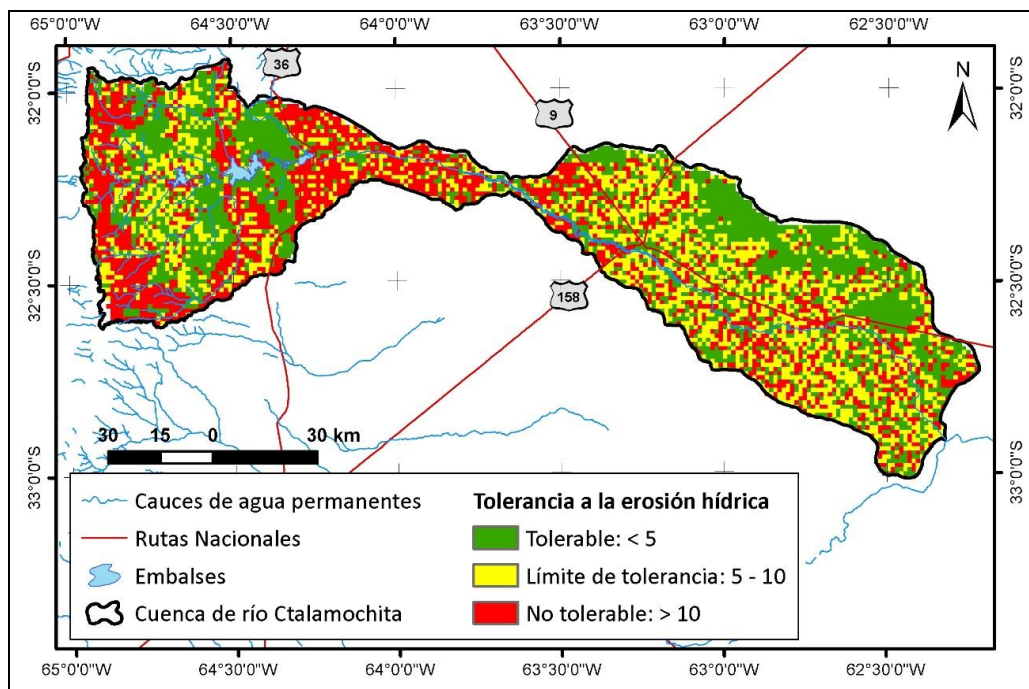
Según Wischmeier y Smith, 1978, las pérdidas de  $12,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  son admisibles como máximo en un suelo profundo, de textura media, permeabilidad moderada y con un subsuelo favorable para la vida de las plantas. Mientras que según Hudson, citado por López Cadenas del Llano, 1998, para suelos arenosos profundos son admisibles pérdidas de entre 4 a  $6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  y en suelos francos se admite en un rango entre 13 y  $15 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . En general, para suelos agrícolas, se dan valores de 4 a  $6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  en suelos arenosos poco profundos; de 6 a  $8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  en suelos areno – arcillosos, más de  $12,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  para suelos francos, profundos y fértiles.

Dado que la cuenca casi en su totalidad supera los  $12,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , se plantea un mapa de tolerancia de pérdida de suelo, considerando los valores de la Tabla 3.

**Tabla 3** Tolerancia de pérdida de suelo.

Rango de Pérdida de suelo ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ )	Categoría
0 – 5	Tolerable
5 – 10	Límite de tolerancia
> 10	No tolerable

El mapa de tolerancia de pérdida de suelos se presenta en la Figura 10, donde se aprecia que gran parte de la cuenca alta y media presenta una pérdida de suelo no tolerable, en rojo, siendo pocos y espaciados los sectores donde es aceptable el valor obtenido. Mientras que, en la cuenca baja, especialmente en la zona de bañados, presenta una erosión tolerable.



**Figura 10.** Tolerancia de pérdida de suelos. Fuente: De Antueno, L. 2019.



En cuanto al análisis estadístico, solo el 37,4 % de la cuenca presenta una erosión hídrica tolerable o aceptable, es decir que la cuenca soporta esa erosión, esa pérdida de material, mientras que el 62,6 % restante presenta una erosión de suelo irrecuperable, que no puede remediarse tomando medidas conservacionistas. Esta situación se mantiene tanto en la cuenca alta como en la media-baja, siendo los porcentajes de superficie con erosión hídrica no tolerable los que varían sólo un poco, de 28,4 % en la cuenca media-baja a 37,2 % en el alta.

## CONCLUSIONES

El análisis de la erosión hídrica en la cuenca permitió evidenciar que las mayores pérdidas de suelo se encuentran en concordancia con las laderas de mayores pendientes y altitudes, presentes en la cuenca alta y media. Mientras que, en la parte baja de la cuenca, donde las pendientes son menores y predominan los comportamientos de llanura, los valores de erosión se hacen menores, aunque en muchos sectores se superan los límites tolerables y se observan puntos dispersos con valores picos.

La erosión hídrica, enfocada hacia el cálculo de las toneladas de sedimentos que se pierden en la cuenca, se aprecia que la mayor parte de la zona estudiada, 62,6 %, presenta una pérdida de suelo no tolerable o en el límite de tolerancia.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almorox J., De Antonio, R., Saa, A., Cruz Díaz, M<sup>a</sup>. Gasco, J.M. 1994. Métodos de estimación de la erosión hídrica. Ed. Agrícola Española, 152 p.
- Bahill, J., Gorgas, J.A., Zamora, E., Bosnero, H., Lovera, E., Ravelo, A., Tassile, J. L. 2006. Recursos naturales de la provincia de Córdoba. Los Suelos. Nivel de Reconocimiento 1:500.000. Agencia Córdoba Ambiente, área subcoordinación de suelos, INTA, EEA Manfredi. 541 pp.
- Barrios, A. Quiñonez, E. 2000. Evaluación de la erosión utilizando el modelo ® USLE, con apoyo SIG. Aplicación en la microcuenca de los andes venezolanos. Rev. Forest, Venezuela. 44(1). P65-77.
- De Antueno, L. 2019. Análisis de vulnerabilidad hídrica en la cuenca del río Ctlamochita. Tesis de maestría. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/78532>
- Díaz Lozada J., García M., Herrero H., Barchiesi G., Romagnoli M., Portapila M., López F., Castelló E., Cosavella A. y Brarda J. 2015. Cuantificación del escurrimiento superficial de la cuenca del río Carcarañá. Revista Facultad de Ciencias Exactas. Físicas y Naturales, Vol. 2, No. 1. Pp 59-61.
- Ellison, W. D. (1947). Soil Erosion. Soil Sci. Soc. Am Proc., Madison, 12: 479-484
- Gaitán, J.; Navarro, M. F.; Tenti Veugen, L.; Pizarro, M. J.; Carfagno, P.; Rigo, S. 2017. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. INTA – CIRN. INTA Ediciones. 72 pp.
- Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez Vagaría, A., Besteiro, S. 2013. Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. EDULP, Universidad Nacional de La Plata, 2013. Pp 191.
- UNVM (Universidad Nacional de Villa María). 2015. Proyecto de gestión integral de Recursos Hídricos, Cuenca río Ctlamochita, provincia de Córdoba. Ed. Tissera G., Cejas G., González A. y Preiato S. 285 pp.
- VILLANUEVA, G. y R. OSINAGA, 2004. "Uso Sustentable de los Suelos". Cátedra de Uso Sustentable de los Suelos. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

# COMBINACIÓN DE RECURSOS GEO-TECNOLÓGICOS PARA EL RECONOCIMIENTO Y ANÁLISIS DE CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS EN UN TRAMO DEL RÍO QUINTO

Daniel A. Dueñas<sup>a</sup>, Graciela del R. Sosa<sup>ab</sup> y Francisco Herrera Sánchez<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Geología, FCFMyN, Universidad Nacional de San Luis, ARGENTINA

<sup>b</sup>Escuela de Ingeniería y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Villa Mercedes,  
ARGENTINA

e-mail: [dduenas@unsl.edu.ar](mailto:dduenas@unsl.edu.ar)

## RESUMEN

*El tramo del río Quinto estudiado se inserta en el municipio de Villa Mercedes, ubicado 98 km al sureste de la ciudad de San Luis. El relieve de planicie que rodea el sector presenta edad cuaternaria principalmente y las áreas aledañas al valle del río son el producto de la acción eólica con participación fluvial subordinada. Las variaciones en las precipitaciones observadas en la región y la respuesta de la cuenca de aporte ante eventos hidrometeorológicos extremos, provocaron situaciones críticas en la zona urbana. Para reconocer los cambios geomorfológicos del río y la influencia de las precipitaciones en los últimos 50 años, se trabajó bajo un entorno SIG y se aplicaron técnicas tradicionales de fotointerpretación en fotografías aéreas e imágenes satelitales, a las que se incorporaron fotografías, ortomosaicos y modelos digitales de elevación obtenidos a través de vuelos con un dron y control de campo. En base a esta información, se realizó el análisis multitemporal de las modificaciones naturales y efectos antrópicos del tramo bajo estudio junto con un abordaje histórico de las series de lluvia y alturas hidrométricas. El análisis de las precipitaciones indica que el aumento a partir de la década de 1980 generó un mayor aporte de caudales líquidos y sólidos al cauce, mediante ciclos húmedos bien marcados con algunos años donde las lluvias superaron ampliamente a las medias anuales. Los procesos erosivos asociados a crecidas del río en los años 2001 y 2015 fueron de gran efectividad y sus efectos se reconocen en varios sectores de la morfología fluvial y en las construcciones humanas.*

Palabras Clave: Río Quinto, Villa Mercedes, Morfologías, Dron, SIG.

## INTRODUCCIÓN

La combinación de recursos geo-tecnológicos como los satélites y los Sistemas de Aeronave Pilotadas a Distancia (RPAS por sus siglas en inglés) comúnmente conocido como dron ha aumentado significativamente lo que ha ido acompañado de la aplicación de técnicas de teledetección, georreferenciación y Sistemas de Información Geográfica (SIG). La provincia de San Luis en su Sierra Central presenta una densa red fluvial de la cual se destaca el sistema río Quinto, uno de los principales recursos hídricos de la región. El control estructural evidenciado en los tramos rectos y meandros encajados es coincidente con la configuración de bloques de basamento subaflorantes que dan cuenta de la influencia de la tectónica. El área de estudio comprende el segmento del río que atraviesa el ejido de la ciudad de Villa Mercedes y presenta un relieve suavemente ondulado de edad cuaternaria predominantemente.

El trabajo consistió en un análisis geomorfológico, hidrológico y de la actividad antropogénica que permitió reconocer cambios en el ambiente fluvial a través de un análisis temporal de las variaciones morfológicas y morfodinámicas del río para el lapso 1975-2019. Con la finalidad de reconocer y caracterizar los procesos naturales y antrópicos que actúan como factores de ajuste se utilizaron imágenes aeroespaciales, el uso de un SIG, relevamientos con RPAS y controles de campo.

Se realizó la identificación morfológica del cauce la cual permitió evaluar los desequilibrios morfodinámicos del sistema ya que, en los últimos 50 años el río Quinto manifestó comportamientos complejos y dinámicos como consecuencia de los elevados caudales producto del aumento de las lluvias a partir de la década de 1980, acrecentando los procesos erosivos y depositacionales que incidieron en la morfología y dinámica de su cauce, con importantes consecuencias sobre obras civiles.

## **METODOLOGÍA**

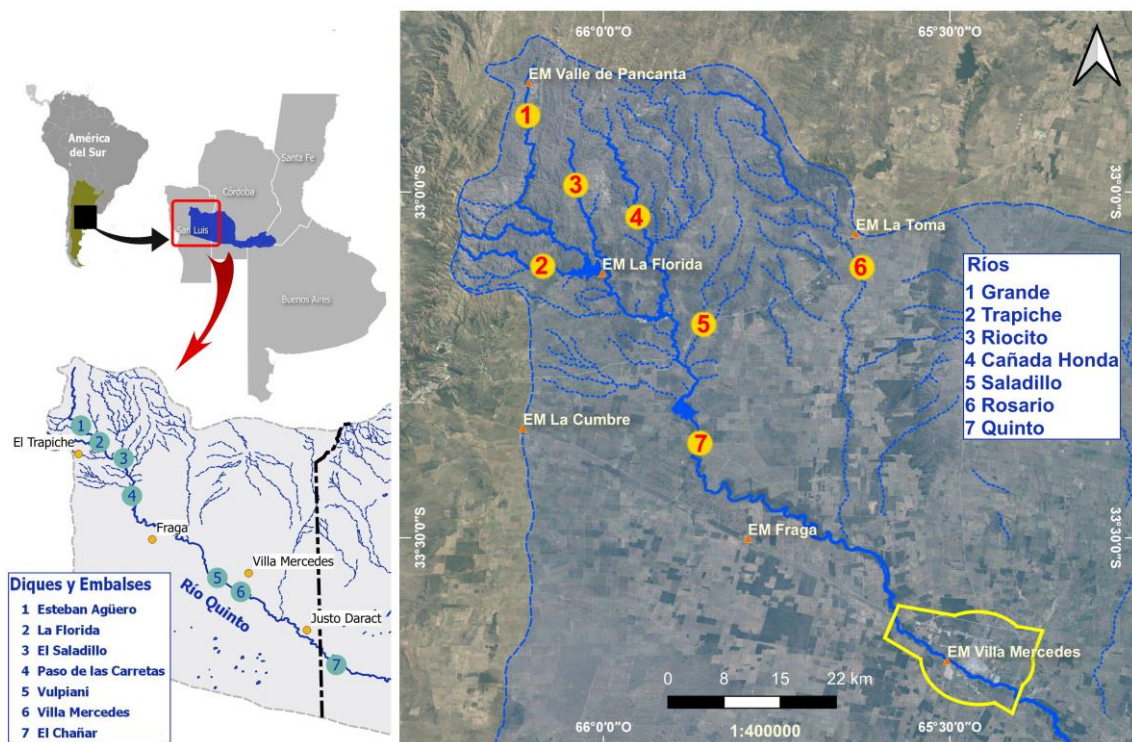
Para reconocer los cambios geomorfológicos del río Quinto se definieron puntos de control y en ellos se realizó el análisis multitemporal de las modificaciones naturales y antrópicas aplicando técnicas tradicionales de fotointerpretación en fotografías aéreas a escala 1:20000 del año 1975 e imágenes satelitales del software Google Earth (2003 y 2019). También se utilizaron ortomosaicos y Modelos Digitales de Elevación (MDE) de detalle ( $\leq 1$  m). En base a esta información, se identificaron las modificaciones del cauce y los procesos erosivos-sedimentarios.

Para conocer la influencia de las precipitaciones en los últimos 50 años se realizó un abordaje histórico a través de la recopilación y procesamiento de la información de diferentes fuentes como los datos de precipitación de la serie 2008-2019 de la Red de Estaciones Meteorológicas de la provincia de San Luis ([www.clima.edu.ar](http://www.clima.edu.ar)), los registros de la serie temporal 1900-2006 (Ojeda y Sosa, 2009) y que fuera ampliada en la serie temporal 1903-2019 de FICA-UNSL Villa Mercedes. Además se utilizaron los datos de caudales y alturas hidrométricas de la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación ([www.snih.hidricosargentina.gob.ar](http://www.snih.hidricosargentina.gob.ar)). Con esta información se construyeron series de precipitación anual, caudales medios y alturas hidrométricas.

Durante las tareas de campo se utilizó un navegador GPS para localizar los puntos de control. En cada lugar, se realizó la verificación de las unidades geomorfológicas, estratigráficas y procesos de erosión fluvial, desbordes y sedimentación identificados a través de campañas de vuelo con una plataforma RPAS, cuadricóptero marca DJI modelo Spark, obteniendo numerosas fotografías de cada sector con las que se generaron luego los respectivos ortomosaicos y MDE de detalle. El procesamiento de la información y elaboración de mapas se realizó utilizando el programa Quantum GIS 2019 (QGIS 3.8 Zanzibar).

## **AREA DE ESTUDIO**

El área de estudio se encuentra ubicada en el centro-este de la provincia de San Luis y se sitúa en la cuenca media del río Quinto (ver Fig. 1). Esta cuenca hidrográfica drena sus aguas desde el faldeo suroriental de la Sierra de San Luis y descarga sus excedentes en los bañados y lagunas de La Amarga, al sur de Córdoba. El tramo analizado del río cruza el ejido municipal de la ciudad de Villa Mercedes ( $33^{\circ}40'32.6''$  S y  $65^{\circ}27.47'$  O) con una longitud de canal de unos 28 km.



**Figura 1.** Mapa regional con la ubicación de la zona superior y media de la cuenca del río Quinto y sus tributarios. Se identifica el ejido municipal de Villa Mercedes (polígono amarillo), estaciones meteorológicas (puntos naranjas) la red de drenaje (líneas azules).

## CONTEXTO GEOLÓGICO - GEOMORFOLÓGICO

Desde el punto de vista geológico, la cuenca del río Quinto se desarrolla en los ambientes de Sierras Pampeanas Orientales y Llanura Chacopampeana (Ramos 1999), mientras que el área de estudio se ubica en la zona de transición entre ambas unidades. En la cuenca alta y media afloran rocas cristalinas ígneo-metamórficas de edad precámbrica a paleozoica temprana (Sims et al. 1997, entre otros). En el ambiente extraserrano del área de estudio, el río Quinto fluye a través de sedimentos neógenos y cuaternarios con distinto grado de consolidación que controlan la configuración del canal.

En el lecho y márgenes del río afloran sedimentitas de origen fluvial de la Formación Rio Quinto (Santa Cruz, 1979), compuesta por limos arcillosos y grava dispersa. Apoyados a través de un contacto neto las sedimentitas de la Formación Fraga (Santa Cruz, 1979) se constituyen de psamitas y psefitas predominantemente fluviales de alta energía con estructuras plano diagonal a entrecruzada y geometría acanalada con base erosiva. Por último, mediante contacto transicional se disponen depósitos eólicos masivos de baja cohesión conformados por limos finos asignables a la Formación Barranquita (Latrubesse y Ramonell, 1990), cuya edad, en base a su contenido fosilífero, ha sido referida al Pleistoceno superior- Holoceno. El río desarrolla una faja fluvial de ancho variable que es controlada tanto por la litología como por las morfoestructuras que atraviesa (bloques subaflorantes) según la posición del tramo bajo estudio.

Los rasgos geomorfológicos de la provincia de San Luis responden a un clásico control estructural regional, conocido como estructura de bloques y depresiones longitudinales González Díaz (1981). En el centro-este de la provincia se encuentra las unidades Sierra de San Luis y la Depresión Oriental y hacia el sur domina la Planicie Medanososa, mientras que el área de estudio se enmarca en la región limítrofe entre estas últimas unidades geomorfológicas (zona de interdigitación entre rasgos pampeanos y de llanura). Costa et al., (2005) añadieron una nueva unidad en este sector denominada Planicie Loessoide Medanososa y abarca gran parte del área de estudio e incluye un sector de lo que González Díaz (1981) caracterizó como "Planicie Loessoide" (Depresión Oriental) y parte de la "subzona occidental" (Planicie Medanososa Austral) que comprende aquellos sectores de morfología suavemente ondulada interrumpida por el valle del río Quinto.

## **CLIMA E HIDROLOGÍA**

La provincia de San Luis se encuentra sujeta a factores dinámicos y físicos del clima propios de su continentalidad y características orográficas. Según la clasificación de Thornthwaite y Mather (1957), corresponde a la región hídrica semiárida con régimen monzónico y torrencial de las precipitaciones. El régimen pluviométrico es mayor durante los meses de verano, la faja de máxima precipitación (>700 mm) se encuentra asociada a la precipitación de tipo orográfica en algunas estribaciones de las Sierras de San Luis y Comechingones a diferencia de otras zonas de la provincia que reciben menos de 300 mm anuales.

La cuenca del río Quinto ocupa una superficie de 34360 km<sup>2</sup> y abarca parte de las provincias de San Luis, Córdoba y Santa Fe. En el territorio puntano presenta distintas estructuras hidráulicas (entre presas y azudes) que regulan las crecidas provocadas por los excedentes del río. La red de drenaje es densa en el tramo medio-superior y se encuentra integrada por los siguientes tributarios principales: río Grande, Trapiche, Riocito, Cañada Honda, Saladillo y Rosario.

## **RESULTADOS**

### **Cambios Geomorfológicos del río Quinto**

A partir de las diferentes fotografías aeroespaciales y teniendo en cuenta las características geológicas-geomorfológicas e hidrográficas del área de estudio y el análisis de los cambios observados, se definieron 2 puntos de control en el río (La Gruta y Los Ranqueles) donde se estimaron indicadores morfológicos (relación ancho/profundidad del cauce lleno y gradiente del canal) indicadores morfodinámicos (procesos de erosión, desbordes y sedimentación) e indicadores sedimentológicos (parámetros texturales del cauce).

El perfil longitudinal del río Quinto en el área de estudio es cóncavo con una pendiente promedio menor a 1%, un desnivel de 82 m en 28 km y muestra cambios en la pendiente del lecho evidenciado en el terreno como resaltos topográficos (*knickpoints*) asociados a la interacción entre la litología y estructura de la zona. En planta, presenta un canal simple y muestra un valor de sinuosidad ( $S_{2019}=1,27$ ) correspondiendo a un canal transicional (Schumm, 1963).

Considerando su variabilidad temporal (1975, 2003 y 2019) el río, a lo largo del ejido municipal expuso transiciones de su trazado mostrando un fuerte estrechamiento del

canal donde el gradiente es mayor (ver Fig. 2) incidiendo sobre los materiales cohesivos controlando la migración lateral lo que fue observado en los años 2003 y 2019 en el sitio La Gruta.



**Figura 2.** Análisis multitemporal de los estadios del río Quinto en el punto de control La Gruta.

Mientras que en el segmento con fuerte presión antrópica, sitio Los Ranqueles ha experimentado un profundo cambio en su modelo de cauce. El patrón mutó desde entrelazado de canal múltiple (1975) hacia uno de baja sinuosidad de canal único durante el año 2019 (ver Fig. 3).

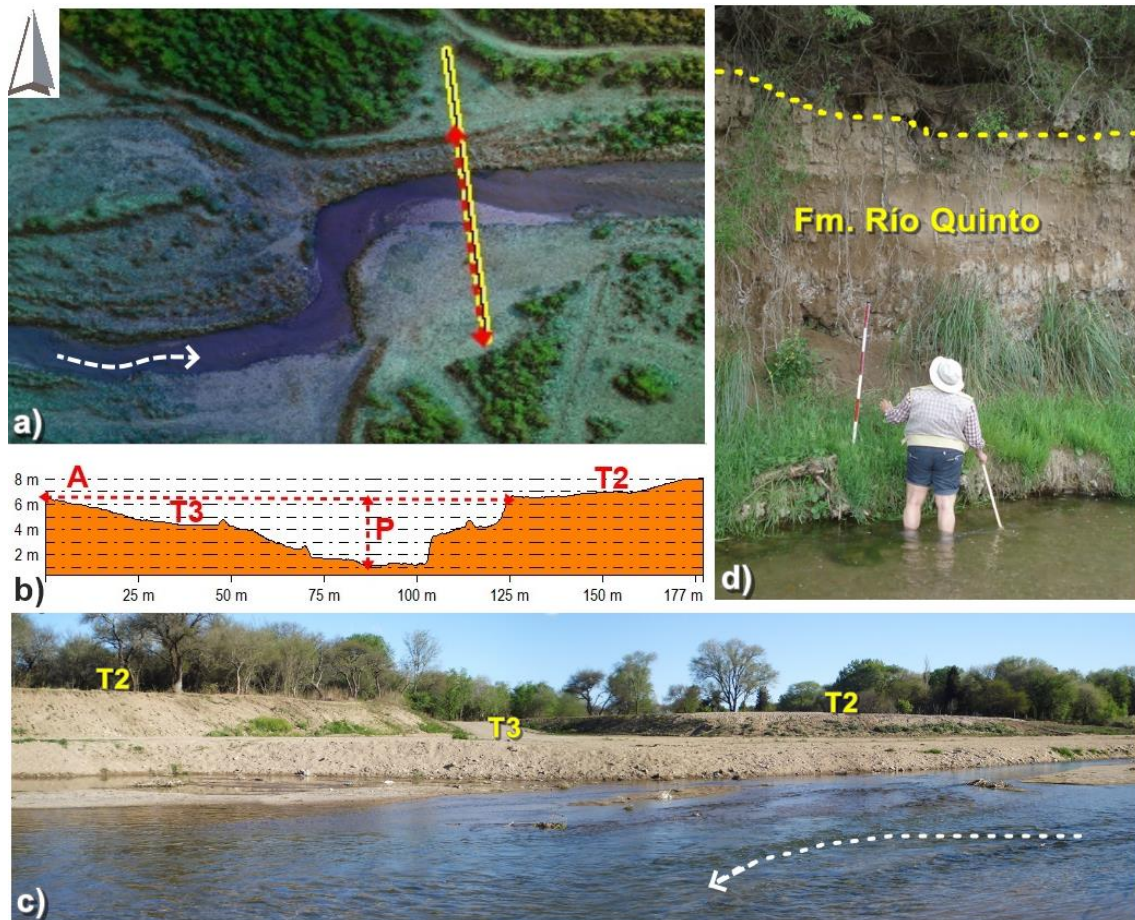


**Figura 3.** Análisis multitemporal de los estadios del río Quinto en el punto de control Los Ranqueles.

La sección del sitio La Gruta ( $33^{\circ}38'11.36''S$  y  $65^{\circ}33'59.86''O$ ) presenta un ancho de canal lleno de 148 m, una profundidad máxima de 2,9 m y su relación ancho profundidad (A/P) arrojó un valor de 51. El cauce expone un canal único, rectilíneo de 13 m de ancho y gradiente menor a 2% con un lecho móvil compuesto mayoritariamente por grava muy fina y desarrolla barras centrales y laterales compuestas por arena gruesa a grava fina. El lugar presenta un valle fluvial poco profundo que exhibe 2 niveles de terrazas apareadas y asimétricas. El canal está parcialmente encajado en las rocas cohesivas de la Formación Río Quinto y Formación Fraga, lo cual ofrece resistencia a la erosión del agua (principalmente lateral) lo que le confiere alta estabilidad en la barranca de la margen izquierda (ver Fig. 4). La llanura aluvial es asimétrica con un mayor desarrollo en la margen derecha constituida mayoritariamente por arena gruesa a grava fina. Por sus características, el segmento

revelaría un dominio de la erosión y el transporte sobre la sedimentación con una baja migración lateral.

Por otro lado, el lugar presenta reducción de la cobertura ribereña por desmonte y transformación de la llanura de inundación y los niveles de terrazas alteradas por la actividad minera.

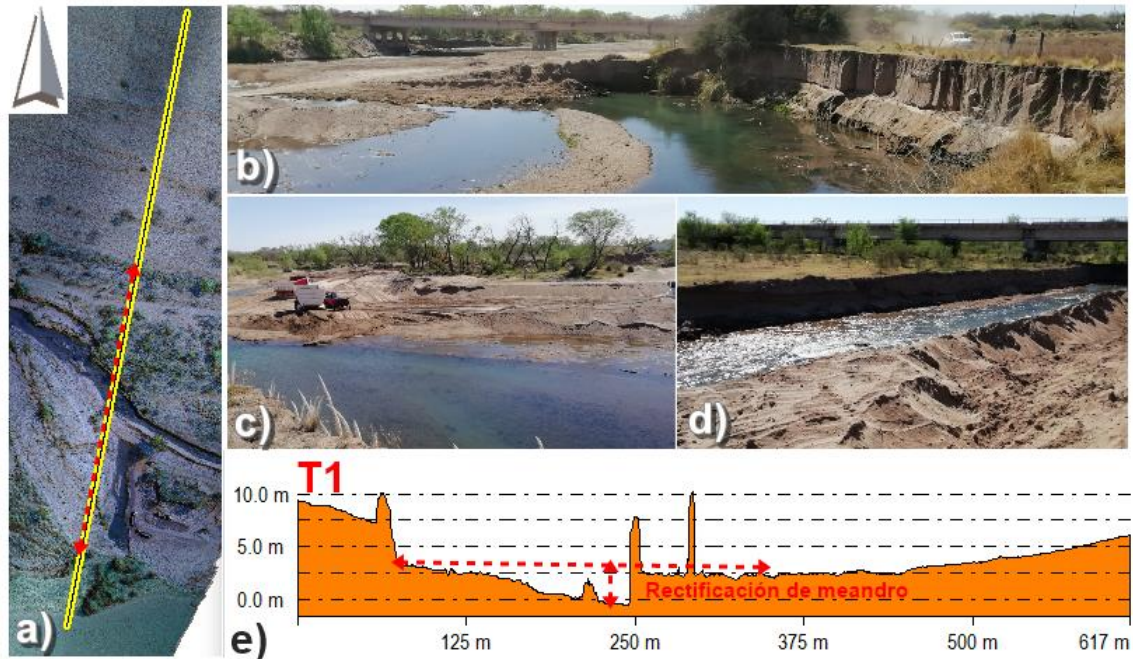


**Figura 4.** a. Superposición entre ortomosaico y MDE del sitio La Gruta. b. Determinación de la sección de canal lleno. c. Niveles de terraza de la margen derecha del canal. d. Sedimentitas de la Formación Río Quinto en la barranca de la margen izquierda.

La sección del sitio Los Ranqueles ( $33^{\circ}43'6.56''S$  y  $65^{\circ}24'29.35''O$ ) está presenta un ancho de canal lleno de 350 m y una profundidad máxima de 3,5 m. La relación ancho profundidad (A/P) arrojó un valor de 100. El cauce expone un canal único de 18 m de ancho y gradiente menor a 0,6%, con un lecho móvil compuesto mayoritariamente por grava mediana a gruesa y desarrollo de barras laterales, oblicuas y centrales (algunas fijadas por la vegetación) compuestas por arena gruesa a grava gruesa. El lugar presenta un valle fluvial amplio y poco profundo, aquí los niveles de terrazas se encuentran alterados por la propia dinámica del río (divagación y ensanchamiento) y la actividad antrópica, dificultando su identificación (ver Fig. 5). El curso ha erosionando los materiales poco consolidados de las márgenes (baja resistencia a la erosión lateral) y se halla marginado por una llanura aluvial amplia constituida por arena gruesa a grava gruesa, con un desarrollo superior a 400 m. Por sus características, la sedimentación es



uno de los procesos dominantes de este segmento con una alta migración lateral. El sector tiene modificaciones producto de la presión antrópica, aunque presenta vegetación ribereña, muestra una marcada actividad relacionada a la extracción de áridos como también los efectos provocados por la rectificación de meandros y profundización del canal, a tal punto que, en sectores, el lecho se encuentra atravesando los sedimentos calcretizados de la Formación Río Quinto.



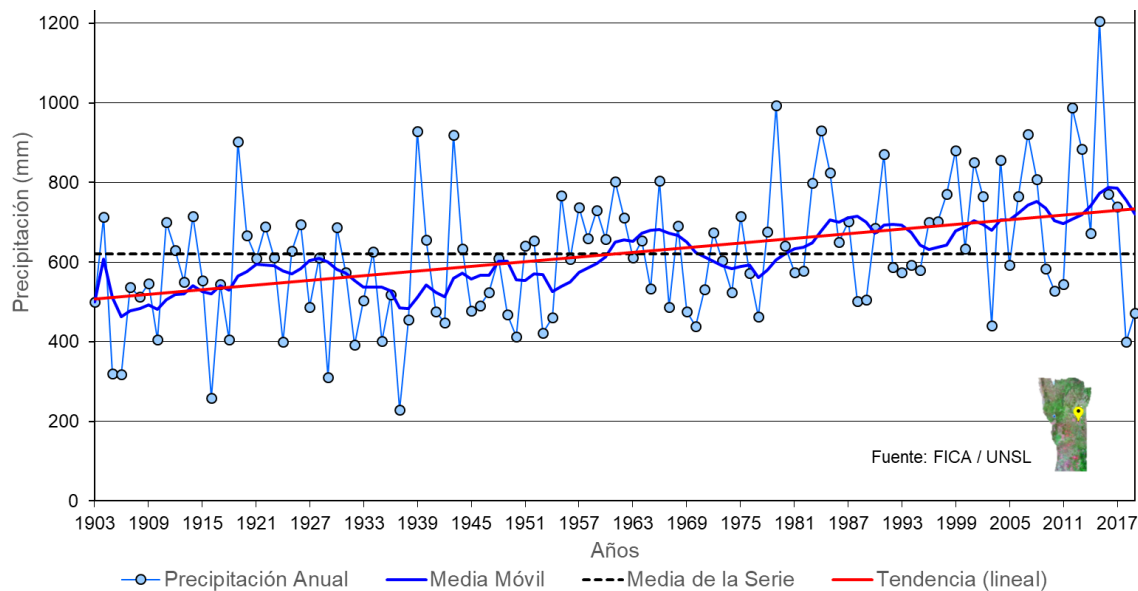
**Figura 5.** a. Superposición entre ortomosaico y MDE del sitio Los Ranqueles. b. Curva de meandro y barranca de la margen derecha del canal. c. Extracción de áridos. d. Rectificación del canal. e. Determinación de la sección de canal lleno.

### Abordaje histórico de las series de lluvia y alturas hidrométricas

Los datos de lluvia fueron analizados con la finalidad de obtener una síntesis actualizada para la zona de estudio con el fin de considerar el comportamiento de las precipitaciones, e indagar fundamentalmente sobre la influencia de los últimos 39 años (1980-2019) periodo de incremento en las lluvias y su relación con las crecidas del río. Por lo que se recurrió a los datos recopilados del área de climatología de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la ciudad de Villa Mercedes (FICA- UNSL) serie 1903-2019 y los datos publicados por la Red de Estaciones Meteorológicas para las Estaciones Meteorológicas (EM) El Trapiche (serie 2008-2019) y Valle de Pancanta (serie 2008-2019). El análisis de los datos de lluvia considerados relevantes de la cuenca busca entender la influencia de las precipitaciones sobre la dinámica del río Quinto, esta información indicó que las lluvias se concentran cerca del 75% durante el verano y primavera, alrededor del 25% restante en otoño e invierno, con algunas fluctuaciones.

En la Fig. 6 se representa el comportamiento de las precipitaciones anuales a lo largo del tiempo que fueron graficadas con la finalidad de conocer la evolución de cada una de ellas, su variabilidad interanual y correspondiente tendencia temporal. En el gráfico se observa la curva de precipitación anual (media móvil) y la evolución del registro pluviométrico (tendencia lineal) de Villa Mercedes, con un marcado incremento de las

precipitaciones a partir de la década de 1980. Los acumulados por encima de la media anual, y que para los años subsiguientes se incrementa, alcanza máximos entre 800 mm a 1000 mm anuales, y finalmente para el año 2015 registra una precipitación de 1200 mm anuales. La instalación de condiciones húmedas queda indicada por el incremento en el régimen de precipitaciones, alrededor del 35%, estableciendo un comportamiento específico dentro de este ámbito geográfico.



**Figura 6.** Precipitación anual de Villa Mercedes (serie 1903-2019).

### Hidrometría

A partir del análisis de la información hídrica se intenta vincular los caudales y alturas hidrométricas en relación a los eventos de precipitaciones extremas, con el objetivo de contribuir a la interpretación morfodinámica del segmento del río Quinto comprendido dentro del municipio de Villa Mercedes. En la estación hidrométrica denominada SSRH 1613 - Quinto - Dique Villa Mercedes (ver Fig. 7 a) ubicada físicamente en el dique Vulpiani se registraron datos de caudal para una serie comprendida entre los años 1915 a 1980 junto con alturas hidrométricas para el período 2012-2019. Esta información fue de utilidad ya que permitió hacer un estudio de los caudales y alturas hidrométricas asociadas a crecidas que fueron inducidas por las precipitaciones y sus efectos morfológicos y morfodinámicos en el río Quinto dentro del área de estudio. Del análisis comparativo es posible determinar una buena correlación entre los eventos de precipitación extrema registrados por las EM El Trapiche y Valle de Pancanta (ver Fig. 7 b) y el comportamiento de las alturas hidrométricas del dique Vulpiani, donde se destacan aquellas alturas superiores a 2 m sobre el nivel de referencia, en particular las ocurridas en los años 2014 (2,3 m) y 2015 (4,5 m) evidenciando que los datos registrados por las EM son de gran utilidad para determinar la respuesta hidrológica general de la cuenca.



**Figura 7.a.** Caudales medios del río Quinto (serie 1915-1980). **b.** Alturas hidrométricas del dique Vulpiani con las precipitaciones acumuladas de la EM de El Trapiche y Valle de Pancanta (serie 2012-2019).

### Crecidas históricas del río Quinto

Los daños provocados como consecuencia de la severidad de los caudales del río Quinto en el ejido municipal de Villa Mercedes, son testimonios de la intensidad de las precipitaciones en la cuenca. El día 1 marzo de 2015 la provincia de San Luis estuvo sometida a un evento de precipitación extrema que dejó un total de lluvia acumulada en 24 horas de 298,6 mm registrados en la EM Mesilla del Cura. El temporal provocó el desborde de ríos e inundaciones y varias localidades serranas quedaron con cuantiosas pérdidas materiales. En particular ese evento provocó la crecida del río Quinto superando los 4 m de altura en el dique Vulpiani (ver Fig. 7 b) y fue posible individualizarlo a partir del historial de imágenes satelitales de Google Earth a partir de sus improntas como el arrasamiento de la vegetación ribereña.

El evento extremo acaecido el 13 abril de 2001 fue de gran importancia debido a sus efectos, esta tormenta dio lugar a la mayor inundación que haya afectado a la localidad de El Trapiche y áreas aledañas al río Quinto en tiempos históricos (Ojeda y Sosa, 2009) marcando un precedente en lo que refiere a precipitaciones extremas. Las intensas lluvias registradas por el Sistema de Telemedición de la Cuenca del río Quinto dependiente del Departamento de Hidrología de la Empresa Provincial de Infraestructura Hídrica (EPIH) midió valores de intensidad máxima en una hora de: 131 mm en la estación Virorco (subcuenca río El Trapiche); 160 mm en la estación Carolina (subcuenca río Grande); 99 mm en la estación Los Chañares (subcuenca río Cañada

Honda); 133 mm en la estación El Rincón (subcuenca río Cañada Honda). Este evento provocó en el área de estudio la crecida del río Quinto que destruyó el puente de la RP N°2B, causando entre otras cosas la interrupción del servicio de gas, electricidad y de agua potable. Generó también el desborde del cauce afectando el muro de gaviones que protegía el sistema de Gasoducto Troncal Norte (TGN), destrucción parcial de obras de contención ante crecidas, como también la inundación de diferentes zonas de la trama urbana de la ciudad aledañas al cauce.

En los trabajos recopilados de Bertoni et al. (2004) y Bertoni et al. (2005) indican que durante el día 13 de abril de 2001 se desarrolló la máxima crecida (caudal pico de 1140 m<sup>3</sup>/s) registrada en la estación hidrométrica dique Vulpiani desde el año 1970. Según Marchetti (1969) el río Quinto ha presentado crecidas extraordinarias, de las cuales destaca la del año 1903, estando iniciada la construcción del dique Vulpiani, donde el personal de obra estimó un caudal de crecida hacia el mes de enero de 2300 m<sup>3</sup>/s. Posteriormente, durante el año 1916 y finalizada la obra, tuvo lugar otra crecida el 10 de febrero con un caudal de 1400 m<sup>3</sup>/s, mientras que para el mes de febrero del año 1917 se calculó un caudal máximo instantáneo de 359 m<sup>3</sup>/s.

## **CONCLUSIONES**

El estudio histórico permite advertir cambios en la geomorfología del río de los cuales se destaca el incremento significativo de la longitud del canal, manifestando una extensión de un 14,6% lo cual equivaldría a 2 km en el segmento que circula en contacto directo con la ciudad. Se acentúa también la disminución y profundización de la anchura del cauce y la alteración de los niveles de terraza provocada por la dinámica fluvial y la actividad antrópica.

La presión antrópica es evidente en las imágenes aeroespaciales de los años 1975, 2003 y 2019 a través de las alteraciones sobreimpuestas al cauce provocadas entre otras cosas por el desmonte de la vegetación ribereña, el control del dominio fluvial a través de obras civiles y la extracción de áridos.

Las variaciones morfológicas y morfodinámicas del río Quinto en parte corresponderían a un comportamiento provocado por el cambio en el sistema hidrológico que modifica el régimen de la descarga y suministro de sedimentos que han sido acelerados por las actividades humanas.

El análisis multitemporal, permite aseverar que la morfología fluvial del río Quinto ha estado expuesta a cambios en el transcurso del tiempo, en respuesta a la influencia del aumento en las precipitaciones como se evidencia desde el comienzo de la década de 1980.

Tal y como hemos podido comprobar el uso de imágenes satelitales en combinación con los RPAS fueron de gran utilidad para identificar los cambios que experimentó el tramo fluvial bajo estudio a lo largo del tiempo. El uso de esta tecnología permite tener una mejor resolución temporal y espacial, logrando un mayor grado de detalle en la determinación de los elementos geomorfológicos.

## **REFERENCIAS**

Costa, C., Ortiz Suárez, A., Miró, R., Chiesa, J., Ojeda, G., Gardini, G., Carugno Duran, A., Guerstein, P., Strasser E., Morla, P., Tognelli, G. Hoja Geológica 3366-IV, Villa Mercedes,

- Provincias de San Luis y Córdoba. Esc: 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 348, Buenos Aires (2005).
- González Díaz, E. Geomorfología, Geología y Recursos Naturales de Provincia de San Luis. 8° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 193-236, Buenos Aires (1981).
- Latrubesse, E. y Ramonell, C. Unidades litoestratigráficas del Cuaternario en la Provincia de San Luis, Argentina. In Congreso Geológico Argentino XI, Actas 2: 109-112, San Juan, Argentina (1990).
- Ojeda G. y G. Sosa. 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: 4761. UNT. (Eds.) Dr. J.M.Sayago y Dra. M.M. Collantes. ISBN 978-987-9390-36-2 (2009).
- Ramos, V.A. Las provincias geológicas del territorio argentino. En Caminos, R. (ed.) Geología Argentina, SEGEMAR, Anales 29: 41-96, Buenos Aires (1999).
- Santa Cruz, J. Geología de las unidades sedimentarias aflorantes en el área de las cuencas de los ríos Quinto y Conlara. Provincia de San Luis. República Argentina. In Congreso Geológico Argentino VII, Actas 1: 335-349. Neuquén. Argentina (1979).
- Sims, J., Stuart Smith, P., Lyons P. y Skirrow, R. Informe Geológico y Metalogénico de las Sierras de San Luis y Comechingones, provincias de San Luis y Córdoba. Servicio Geológico Minero Argentino Anales 28: 1-148 p (1997).
- Schumm, S.A. Sinuosity of Alluvial Rivers in the Great Plains. Bulletin of the Geological Society of America, 74, 1089-1100 (1963).
- Thornthwaite, C. W, and J. R. Mather. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. Publications in Climatology, Volume X, Number 3. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, New Jersey (1957).

# PRECIPITACIONES DIARIAS MÁXIMAS Y PERIODOS DE RETORNO PARA LA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE SERIE MÁS LARGA, SAN LUIS. ARGENTINA.

Joaquín Facini<sup>a,b</sup> y Jorge O. Chiesa<sup>b</sup>

<sup>a</sup> CCT- CONICET San Luis, Almirante Brown 907, (5700) San Luis, ARGENTINA

<sup>b</sup> Dpto. Geología, F.C.F.M. y N.-UNSL. Ejército de los Andes 950, (5700) San Luis, ARGENTINA.

e-mail: [facijuaco@gmail.com](mailto:facijuaco@gmail.com)

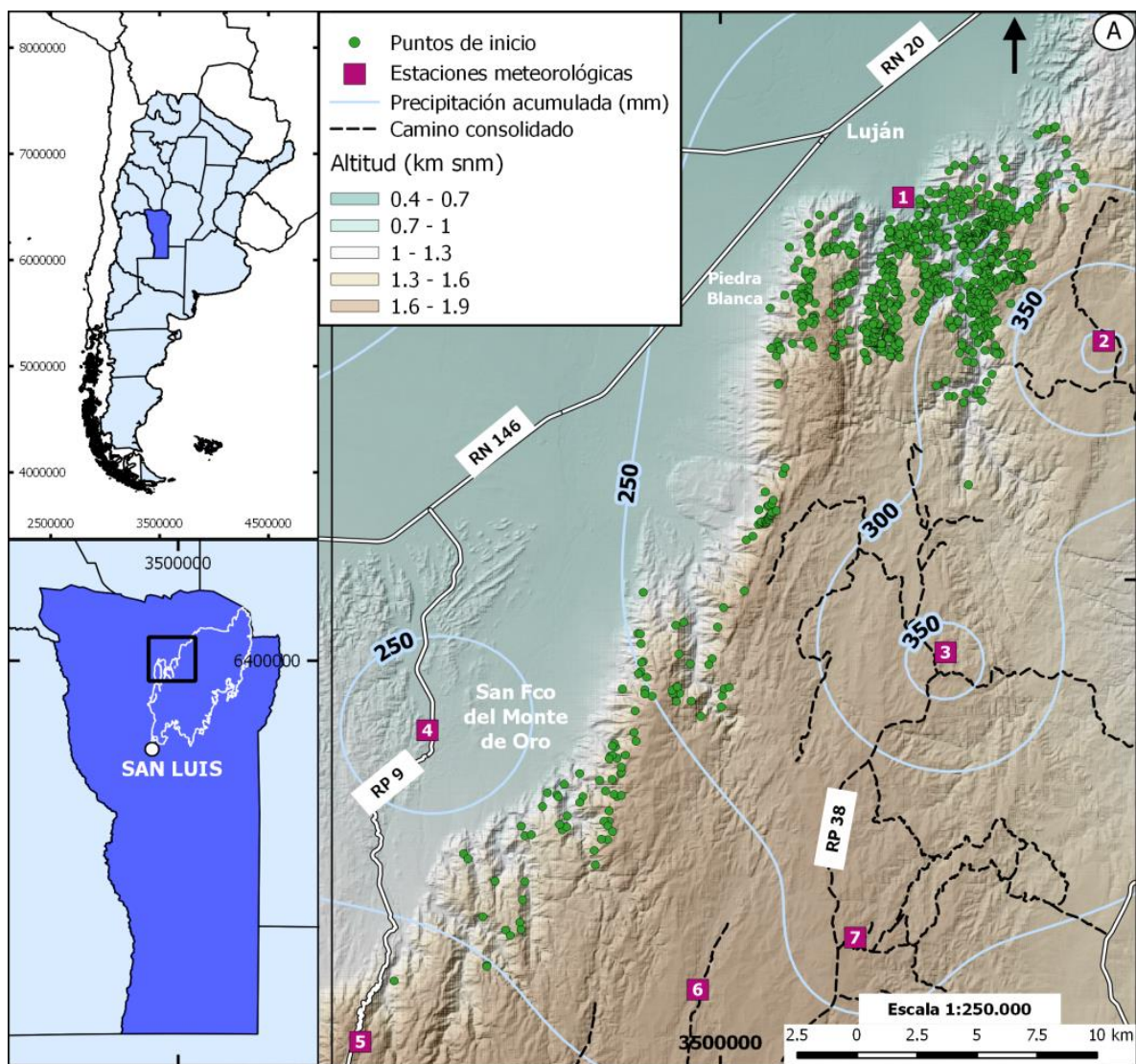
## RESUMEN

*La estación AEROPUERTO SAN LUIS (AEROSL) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) presenta la serie más larga de registros de precipitaciones diarias (1931 a 1946 – 1951 al presente) en la provincia. En febrero del año 2015 se produjeron intensas precipitaciones en toda la provincia, provocando inundaciones que afectaron a las localidades del piedemonte noroccidental de la sierra de San Luis. En ese mes la estación AEROSL registró la máxima precipitación diaria de toda la serie (149 mm). Con el objetivo de conocer la distribución de los datos de la estación y obtener un modelo que permita la predicción de periodos de retorno de lluvias máximas diarias se emplearon diferentes modelos de distribución de probabilidad para datos extremos (Gumbel, Log Pearson III, Log Normal, SQRT-ET max, Valor Extremo Tipo I y Weibull). Como base de datos se utilizaron 70 años de registros continuos (1951-2020). A partir de la estadística de la serie se observó cuál de los modelos ajustó con mayor precisión a la curva empírica de los datos de la estación. Se calculó el periodo de retorno de la precipitación de 2015 y se obtuvieron las magnitudes de lluvias con periodos de retorno de 500, 200, 100, 50, 25, 10 y 5 años. Los coeficientes de correlación de todos los modelos superan el valor de 0.97, de los cuales el que mejor ajusta es el modelo Log Normal (coeficiente de 0.9953). Para este modelo la precipitación de 2015 presenta un periodo de retorno de 828 años, aunque para los modelos más conservadores corresponde a periodos de retorno de 232 años. Según Log Normal los periodos de retorno de 500, 200, 100, 50, 25, 10 y 5 años tienen magnitudes de 142.47, 128.80, 120.1, 111.2, 101.9, 88.9 y 78.2 mm, observándose pequeñas diferencias de magnitud de precipitación para grandes variaciones de periodo.*

Palabras Clave: Precipitación, Gumbel, Frecuencia, Probabilidad, Periodo de retorno

## INTRODUCCIÓN

En febrero del año 2015 se produjeron intensas precipitaciones en toda la provincia de San Luis provocando la crecida de diversos arroyos y ríos que inundaron las localidades del piedemonte noroccidental de la sierra (ver Fig. 1). A partir de los datos de precipitaciones de los pluviómetros (mm/h) de la Red de Estaciones Meteorológicas (REM) de San Luis, se construyeron isohietas de precipitación acumulada. Los valores de las isohietas muestran que en el intervalo de 6 días se alcanzó la cantidad de agua promedio que precipita en el trimestre más lluvioso (Cravero et al, 2017). Además, la lluvia, desencadenó cerca de 1000 flujos de detritos en distintas laderas de la sierra, cuyos puntos de inicio son señalizados con círculos verdes en la Fig. 1. Las localidades más afectadas fueron Quines, Luján, Leandro N. Alem y San Francisco del Monte de Oro.



**Figura 1.** Modelo digital de elevaciones de la zona norte de la Sierra de San Luis, los círculos verdes corresponden a puntos de inicio de flujos de detritos, las líneas celestes a isohietas de precipitación acumulada desde el 26/02/2015 (00 am) a 03/03/2015 (11 pm) y los cuadrados violetas corresponden a pluviómetros de la REM: 1. Quebrada de las Higuieritas, 2. Mesilla del Cura, 3. Frías, 4. San Francisco, 5. El amago, 6. El Arenal, 7. La Estancia.

En algunas áreas de la provincia de San Luis, la ausencia de series largas de precipitación diaria, la interrupción en la adquisición de datos, la falta de digitalización de antiguos registros o el difícil acceso a los mismos, constituye un verdadero problema al momento de evaluar estadísticamente un evento hidrometeorológico particular y contrastarlo con las máximas precipitaciones diarias, las medias mensuales, anuales, etc.

Para el estudio de extremos hidrológicos, donde las tormentas que pueden producir inundaciones se dan en el transcurso de horas o por 2 o 3 días, si el objetivo es caracterizar lo extraordinario o no de un evento, el estudio estadístico requiere datos **diarios** de precipitaciones.

Las series continuas de datos de precipitaciones mayores a 25 años constituyen un valor estadístico aceptable. Desafortunadamente, para la provincia de San Luis, las series que

superan estos valores son mensuales o anuales. Los datos disponibles corresponden a algunos registros recuperados de lo que fue en su momento la Secretaría Hídrica de la Provincia que cuenta con escasos años de datos diarios o de series muy discontinuas.

Otra fuente de datos actualmente disponible y accesible es la Red de Estaciones Meteorológicas (REM) del gobierno provincial que registra precipitaciones por hora (mm/h) y cubre gran parte de la provincia. Sin embargo, fueron instaladas y puestas en funcionamiento en 2007-2011. Por lo tanto, ya sea por escases o discontinuidad, los datos provinciales resultan insuficientes para realizar un análisis estadístico riguroso ya que éste se correlaciona fuertemente a los años de registro.

Ante la ausencia de datos diarios locales es común recurrir a la extrapolación de datos regionalmente cercanos. La estación AEROPUERTO SAN LUIS (AEROSL) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) presenta la serie más larga de registros de precipitaciones diarias (1931 a 1946 – 1951 al presente) en la provincia, 90 años en total pero con una interrupción de 5 años.

Los objetivos de este trabajo son conocer la distribución de las lluvias máximas diarias de la estación AEROSL, correlacionarla con diferentes modelos de distribución, obtener el modelo que mejor se ajusta y predecir la probabilidad de ocurrencia mediante las fórmulas de periodo de retorno.

## **MÉTODOS**

Los datos extremos no se distribuyen de forma simétrica (campana de Gauss) sino asimétrica, generalmente con grandes cantidades de valores bajos y escasas cantidades de valores altos. Se recopilaron y utilizaron diferentes modelos de distribución de probabilidad para datos extremos ampliamente aplicados tanto en hidrología (Chow et al, 1988) como en otros fenómenos ambientales o riesgos financieros. Las escogidas fueron *Gumbel*, *Log Pearson III*, *Log Normal*, *SQRT-ET max*, *Valor Extremo Tipo I* y *Weibull*.

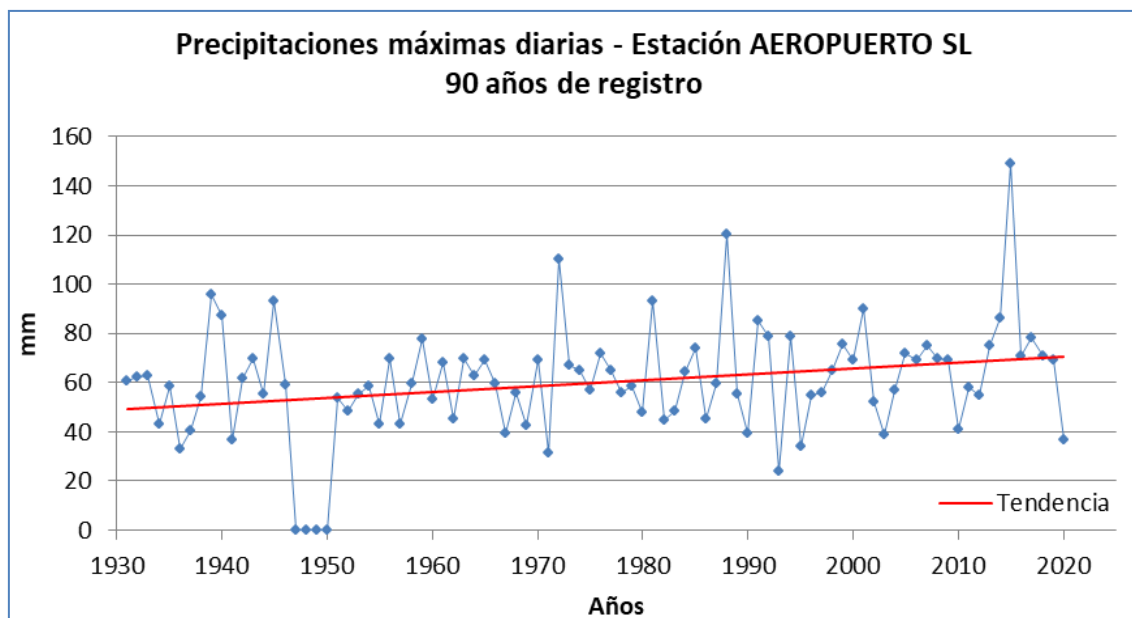
La correlación entre dos variables se puede evaluar mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). El valor de  $r$  oscila entre -1 y 1, reflejando que los datos se ajustan perfectamente a una recta con pendiente negativa o positiva, respectivamente. Un valor de  $r = 0$  refleja la ausencia de correlación lineal entre ambas variables, que no significa que dos variables puedan estar correlacionadas de otra manera, pero no lo están linealmente. Valores tanto entre 0 y 1 como entre 0 y -1 dan diferentes grados de correlación y serán aceptables según el objetivo del estudio que se esté realizando o del nivel de confianza que se requiera. Con el objetivo de observar cuál de ellos tenía el mejor ajuste se utilizó el coeficiente de Pearson  $r$  para correlacionar los diferentes modelos de distribución con la distribución de los datos de la curva empírica.

El periodo de retorno es el inverso de la probabilidad. En hidrología, si la probabilidad de que una precipitación de una determinada magnitud ocurra es del 1%, a ese evento se lo conoce como la lluvia de los 100 años, o la precipitación con periodo de retorno de 100 años (Sánchez, 2017). Los modelos permiten realizar estimaciones futuras sobre la probabilidad de que se supere un valor umbral de precipitación (extremo) y el tiempo de retorno. Para este trabajo, se utilizó la lluvia máxima para conocer la probabilidad de que vuelva a ocurrir y se obtuvieron las magnitudes de lluvias para periodos de retorno de 500, 200, 100, 50, 25, 10 y 5 años.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de consistencia de la información para evitar años donde no se registran datos de precipitación diaria (1947 al 1950) permitió observar 4 años sin mediciones y se decidió descartar los datos anteriores a 1951 resultando la serie con 70 años de mediciones (ver Fig. 2).



**Figura 2.** Serie completa de la estación AERO SL con precipitaciones diarias máximas. Se observa el periodo con valores de cero mm. Los años utilizados en este estudio van desde 1951 a 2020 (70 años).

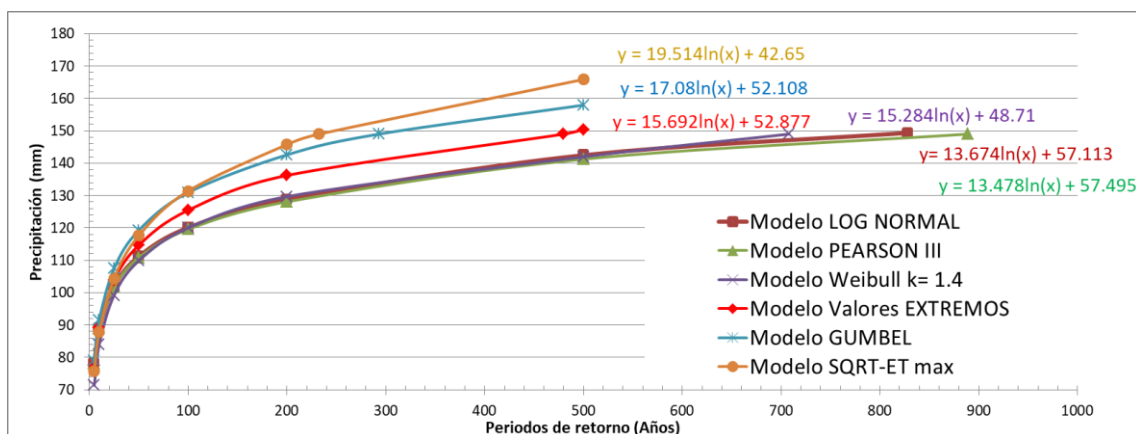
Las características de la serie AERO SL con 70 años se observan en la Tabla I

Tabla I. Resumen de precipitaciones diarias máximas, serie temporal de estación AERO SL.

Número de años	70
Media	63.19 mm
Desviación estándar	19.85 mm
Valor mínimo	24 mm (28-02-1993)
Valor máximo	149 mm (02-02-2015)

De la Fig. 1 y de la Tabla I se puede observar que el máximo valor de precipitación ocurrió en 2015, y aunque se registró casi un mes antes que la precipitación que provocó las inundaciones al norte de la provincia (ver Fig. 1) permite correlacionar regionalmente la estación AERO SL con la zona inundada donde no existen series temporalmente largas.

Con el desarrollo de las fórmulas de los diferentes modelos de distribución de datos extremos se obtuvieron sus funciones con las respectivas pendientes y ordenadas al origen, permitiendo calcular los periodos de retorno para diferentes magnitudes de precipitaciones y viceversa (ver Fig. 3)



**Figura 3.** Modelos de distribución de datos extremos para la estación AERO SL.

El coeficiente de correlación de Pearson  $r$  para todos los modelos supera el valor de 0.97, de los cuales el que mejor ajusta es el modelo Log Normal (coeficiente de 0.9953).

Para el modelo Log Normal la precipitación de 2015 de 149 mm presenta un periodo de retorno de 828 años, aunque para los modelos más conservadores corresponde a periodos de retorno de 232 años. Según Log Normal los periodos de retorno de 500, 200, 100, 50, 25, 10 y 5 años tienen magnitudes de 142.47, 128.80, 120.1, 111.2, 101.9, 88.9 y 78.2 mm, observándose pequeñas diferencias de magnitud de precipitación para grandes variaciones de periodo.

## CONCLUSIONES

La ausencia de series largas dificulta el análisis estadístico de precipitaciones. La REM es un buen puntapié para obtener series largas, lo cual, es pertinente su mantenimiento y mejora sistemáticamente.

La precipitación de 2015 que en San Luis causó inundaciones es, en 70 años de mediciones, la precipitación diaria más extrema que se ha registrado.

El coeficiente de correlación de Pearson  $r$  para todos los modelos es muy alto ( $r > 0.97$ )

El modelo que mejor ajusta es el Log-Normal ( $r > 0.9953$ ). Para este modelo la precipitación de 2015 tiene un periodo de retorno de 828 años, sin embargo los modelos más conservadores estiman para esta lluvia un periodo de retorno de 232 años.

Observando la magnitud de las precipitaciones para diferentes periodos de retorno se puede apreciar que en grandes variaciones de tiempo (diferentes probabilidades) la magnitud no varía considerablemente.

## REFERENCIAS

- Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays. "Applied hydrology." McGraw-Hill, Inc. ISBN: 0-07-010810-2. (1988).
- Cravero S., Bianchi, C., Elena, H. y Bianchi, A. 2017. Clima de la Argentina: adenda del Atlas Climático digital de la República Argentina. Ediciones INTA, Libro digital <http://hdl.handle.net/11336/116761>, 61p., Salta.
- Sánchez, F. J. (2017).- Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Pub., 414 pp.

# SEDIMENTOLOGÍA DEL CUATERNARIO EN EL NOROESTE DE LA SIERRA DE SAN LUIS. SAN LUIS. ARGENTINA.

Joaquín Facini<sup>a,b</sup>, Jorge O. Chiesa<sup>b</sup>, Sergio Georgieff<sup>c</sup>

<sup>a</sup> CCT- CONICET San Luis, Almirante Brown 907, (5700) San Luis, ARGENTINA

<sup>b</sup> Dpto. Geología, F.C.F.M. y N.-UNSL. Ejército de los Andes 950, (5700) San Luis, ARGENTINA

<sup>c</sup> CCT NOA – CONICET, Crisóstomo Álvarez 722. IESGLO - Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán. Miguel Lillo 205, San Miguel de Tucumán (4000), Tucumán, ARGENTINA.

e-mail: [facijuaco@gmail.com](mailto:facijuaco@gmail.com)

## RESUMEN

*Los depósitos cuaternarios del noroeste de la sierra de San Luis apoyan en inconformidad sobre el basamento y comprenden dos ambientes depositacionales contrastantes. Una situación corresponde a los depósitos identificados sobre las paleosuperficies de erosión serranas que rellenan las pampas de altura y los cauces de ríos (espesores inferiores a 10 metros). Otro entorno representan los sedimentos del piedemonte de la sierra (máximo espesor de 5 metros) y con una extendida planicie hacia el oeste, dominada por depósitos eólicos con aluviales subordinados. A través de fotointerpretación y recopilación bibliográfica, levantamiento estratigráfico, muestreo y procesamiento textural de las litologías se distinguieron diferentes unidades. Sobre las paleosuperficies, la base de la sucesión sedimentaria corresponde a conglomerados y areniscas conglomerádicas, fluviales, asignados al Pleistoceno tardío y correlacionados con la Formación Alto Grande. Suprayacen arenas limosas, aluviales, vinculadas al Pleistoceno tardío (?) y Holoceno, relacionadas a la Formación Barranquita. Los estratos mencionados son indistintamente cubiertos por horizontes edafizados, que según las secciones, son vinculados a los períodos climáticos cálidos y relativamente húmedos correspondientes al Holoceno medio y superior, que permitieron el desarrollo de vegetación en condiciones de estabilidad del relieve. El techo de la sucesión es asignada al Holoceno tardío, correspondiente a sedimentos aluviales y eólicos correlacionados con la Formación Algarrobito. En tales condiciones geológicas, se destacan las características sedimentológicas consecuencia de un evento de lluvia extraordinaria producida el 01 de marzo del año 2015, generando 957 puntos de inicio de deslizamientos superficiales en la sierra, erosión y desborde en los cauces. En tal sentido, se enfatiza el riesgo de inundación en localidades pedemontanas (Quines, Luján, Leandro N. Alem y San Francisco del Monte de Oro) con la afectación a bienes, puentes y diques. Los avances en el estudio de la exposición a la amenaza, sugieren que existe ocupación de áreas con dinámica fluvio-aluvial activa.*

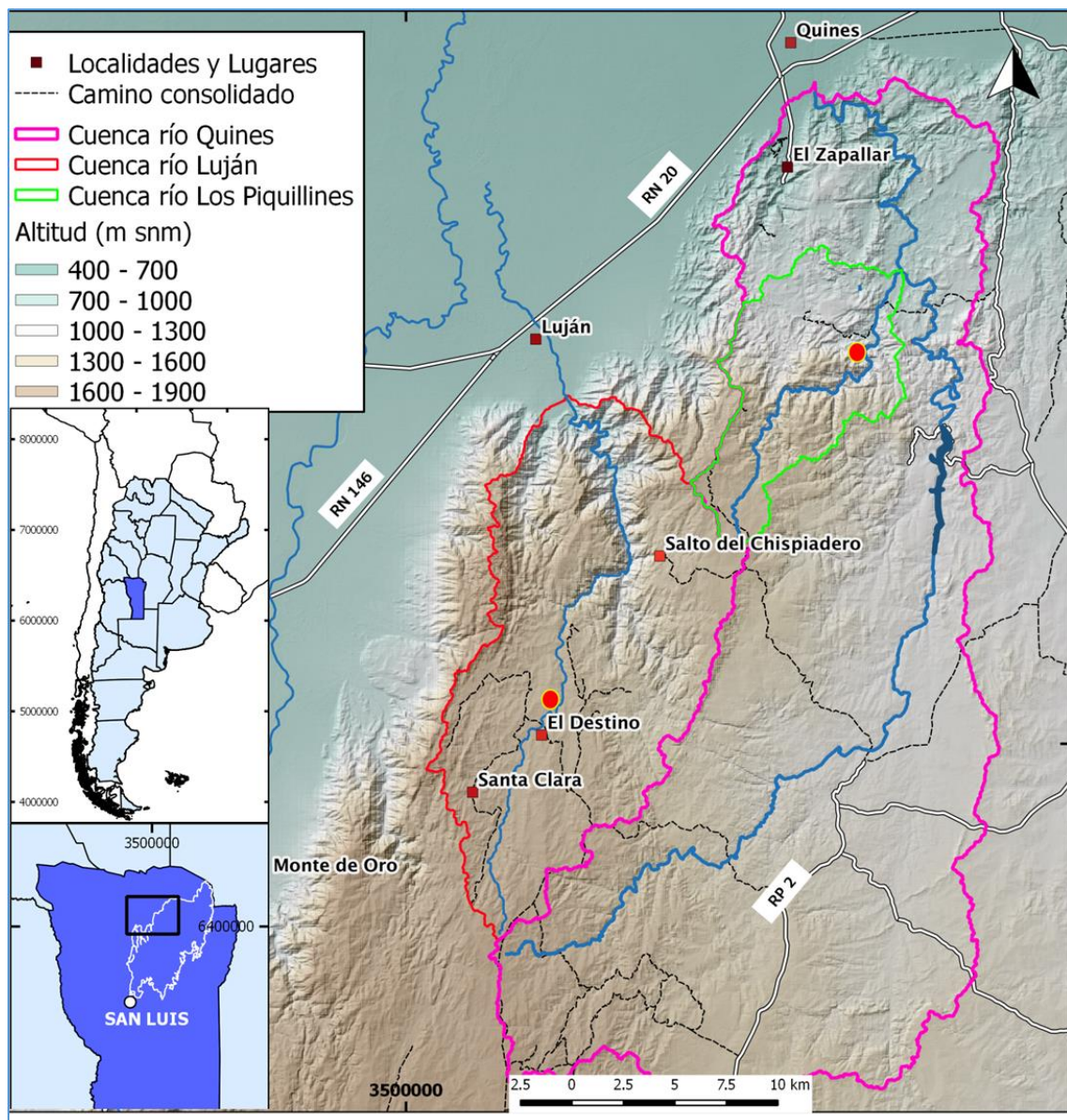
Palabras Clave: Sedimentos, Ambiente, Cuaternario, Geomorfología, Lluvia.

## INTRODUCCIÓN

La sierra de San Luis pertenece a la Provincia Geológica de Sierras Pampeanas (Caminos, 1972 en Ramos, 1999), comparte los típicos rasgos morfoestructurales que le impone los bloques de basamento cristalino geológicamente fallados y desplazados diferencialmente. Presenta orientación NNE-SSO y una fuerte asimetría de sus

vertientes, la oriental suavemente inclinada (pendientes predominantes menores a 10°) y la occidental abrupta (con pendientes superiores a los 25°).

La zona de estudio (ver Fig. 1) se encuentra en el NO de la Sierra de San Luis. Desde el punto de vista estratigráfico, los ríos serranos atraviesan rocas metamórficas e ígneas de edades precámbricas y paleozoicas inferior y medio que componen el basamento cristalino, y rocas sedimentarias de edad neopaleozoica a cuaternaria que rellenan cuencas intermontanas. En el área serrana las rocas del basamento cristalino corresponden a meta-sedimentitas, esquistos, cuarcitas, gneisses, migmatitas y granitoides con variaciones texturales y composicionales.



**Figura 1.** Modelo digital de elevaciones de la zona norte de la Sierra de San Luis, los círculos rojos corresponden a los perfiles Santa Clara y Los Piquillines.

Los depósitos cuaternarios del noroeste de la sierra de San Luis apoyan en inconformidad sobre el basamento cristalino y comprenden dos ambientes depositacionales contrastantes. Una situación corresponde a los depósitos identificados en la vertiente oriental de la sierra, sobre los remanentes de paleosuperficies de erosión serranas, donde los sedimentos rellenan los valles y “suavizan” aún más la pendiente del paisaje, estos depósitos no superan los 10 metros de espesor y son conocidos como "pampas" en altura (Costa et.al, 1999).

Otro entorno representan los sedimentos del piedemonte de la vertiente occidental de la sierra, con escarpa por fallamiento de la sierra donde los espesores máximos alcanzan los 5 metros y la extendida planicie hacia el oeste, dominada por depósitos eólicos con aluviales subordinados.

El objetivo de este trabajo consiste en la descripción sedimentológica de los depósitos cuaternarios en los márgenes de los ríos actuales en la vertiente oriental de la sierra de San Luis, correlacionarlos con las unidades descritas en la literatura y determinar similitudes de procesos que actualmente puedan afectar a las localidades ubicadas en la desembocadura de los ríos en el piedemonte occidental.

## **MÉTODOS**

La metodología de trabajo utilizada incluyó tareas de gabinete preliminar, estudios de campo, trabajos de laboratorio y trabajo de gabinete final. En la tarea preliminar se recopilaron trabajos regionales de la zona, se analizaron imágenes satelitales y fotografías aéreas históricas, se fotointerpretaron unidades y confeccionaron mapas preliminares para su posterior control de campo. A su vez, también se analizó la tormenta de 2015 que generó inundaciones en el norte de la Provincia de San Luis, preliminarmente se destacaron posibles zonas en riesgo por inundación.

Los estudios de campo consistieron en el control de las unidades fotointerpretadas, en el levantamiento geológico de perfiles estratigráficos con la descripción de las litologías presentes, estructuras sedimentarias, geometría, tipo y forma de contacto, mediciones de paleocorrientes, etc. Se efectuó la selección y recolección de muestras para el análisis sedimentológico en laboratorio.

Cada muestra (disgregada) fue analizada por tamizado, a los sedimentos fangosos se los procesó mediante el método de Bouyoucos.

En el posterior trabajo de gabinete se obtuvieron los porcentajes de peso de cada muestra para clasificarlas de acuerdo a los trabajos de Folk (1974), se confeccionaron las columnas estratigráficas, se realizó la edición de fotografías y elaboración de gráficos ilustrativos. Por último con los trabajos recopilados se procedió a la correlación con las unidades observadas en la zona de estudio.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se describieron dos perfiles tipo de la vertiente oriental de la sierra que permiten con sus diferencias y similitudes, distinguir los depósitos de “pampas” en altura (Costa et al, 1999) en *depósitos de valle abierto* con desarrollo de humedales (mallines, vegas) y *depósitos de relleno de valles tectónicos estrechos*. El perfil Santa Clara (Facini et al,

2021) descrito en las márgenes del río Luján, en la localidad de El Destino (ver Fig. 1) corresponde a un perfil de valle abierto. Por su parte, el perfil Los Piquillines, (Facini et al, 2021b), descrito en la margen derecha del río homónimo correspondería a un perfil de relleno de valle tectónico estrecho.

Ambos perfiles apoyan en inconformidad sobre el basamento, en Santa Clara el basamento corresponde a migmatitas y en el Perfil Los piquillines a metapelitas y metarenitas. La base de la sucesión sedimentaria en ambos perfiles corresponde a conglomerados y areniscas conglomerádicas, fluviales, con mayor tamaño de bloques en el perfil Los Piquillines. Han sido asignados al Pleistoceno tardío y correlacionados con la Formación Alto Grande (Latrubesse y Ramonell, 1990). En el perfil Santa Clara, suprayacen arenas y arenas limosas, aluviales, son vinculadas al Pleistoceno tardío - Holoceno temprano, y relacionadas a la Formación Barranquita (Latrubesse y Ramonell, 1990).

Las unidades siguientes difieren según el perfil, en Santa Clara los estratos mencionados son indistintamente cubiertos por horizontes edafizados, que según las secciones, son vinculados a los períodos climáticos cálidos y relativamente húmedos correspondientes al Holoceno medio y superior, que permitieron el desarrollo de la vegetación en condiciones de estabilidad del relieve. En el perfil Los Piquillines se observan arenas y arenas limosas, aluviales, con bloques flotantes de hasta 40 cm. El techo de la sucesión, corresponde a sedimentos aluviales y eólicos asignados al Holoceno tardío, y correlacionados con la Formación Algarrobito (Latrubesse y Ramonell, 1990).

La distinción entre los perfiles se da por características topográficas, predominantemente la pendiente. Esto explicaría en el Perfil Santa Clara el menor tamaño en el esqueleto de los conglomerados basales, la preservación de mayor cantidad de unidades sedimentarias, el desarrollo de horizontes de suelo (estabilidad del sistema) y la actual producción de humedales. En el perfil Los Piquillines el menor espacio de acomodación, el desnivel topográfico entre los cerros y el fondo del valle, la disminución en la sección transversal de los cauces produce que los ríos adquieran mayor energía. En consecuencia, el esqueleto de los conglomerados es de mayor tamaño, existen unidades que no se preservan, (posible erosión o no depositación) y las que se correlacionan con niveles de suelos del perfil Santa Clara, en este perfil son flujos de barro (clima con mayor humedad) que arrastra bloques de gran tamaño.

En la desembocadura de las cuencas de los ríos Luján y Quines (río efluente del río Los Piquillines) se observaron depósitos similares como consecuencia de un evento de lluvia extraordinaria producida entre las 23 hs del 28/02 y las 06 hs del 01/03 del año 2015. Se destaca la presencia de bloques en la desembocadura de los ríos, el barro en las viviendas, el acarreo de árboles y la generación de aproximadamente 1000 puntos de inicio de deslizamientos superficiales en la sierra (Facini et al, este encuentro), sumado a la erosión y desborde en los cauces. En tal sentido, se enfatiza el riesgo de inundación en localidades pedemontanas (Quines, Luján, Leandro N. Alem, San Francisco del Monte de Oro) con la muerte de una persona, la destrucción de vienes, puentes carreteros y la colmatación del dique Luján. Los avances en el estudio de la exposición a la amenaza sugieren que actualmente existe ocupación de áreas con dinámica fluvio-aluvial activa.

## CONCLUSIONES

La vertiente oriental de la sierra presenta dos tipos de rellenos cuaternarios, los *depósitos de valle abierto* (perfil Santa Clara) y los *depósitos de relleno de valles tectónicos estrechos* (perfil Los Piquillines).

La base de la sucesión sedimentaria apoya en inconformidad sobre el basamento y corresponde a conglomerados y areniscas conglomerádicas asignados al Pleistoceno tardío y correlacionados con la Formación Alto Grande (Latrubesse y Ramonell, 1990).

En el perfil Santa Clara, suprayacen arenas y arenas limosas del Pleistoceno tardío - Holoceno temprano, relacionadas a la Formación Barranquita (Latrubesse y Ramonell, 1990). En el perfil Los Piquillines esta unidad no ha sido encontrada.

Las unidades del Holoceno medio y superior son horizontes edafizados en el perfil Santa Clara. En el perfil Los Piquillines son arenas y arenas limosas, aluviales, con bloques flotantes de hasta 40 cm.

El techo de la sucesión, asignado al Holoceno tardío y correlacionado con la Formación Algarrobito (Latrubesse y Ramonell, 1990), lo conforman sedimentos aluviales y eólicos.

Se observan similitudes entre los depósitos encontrados en los perfiles descriptos con aquellos producidos por la lluvia extraordinaria del año 2015.

## REFERENCIAS

- Costa, C., Gardini, C., Ortiz Suárez, A., Chiesa, J., Ojeda, G., Rivarola, D., Strasser, E., Morla, P., Ulacco, J., Tognelli, G., Carugno Durán, A., Vinciguerra, H. y Sales, D. Hoja Geológica 3366-I. San Francisco. Provincias de San Luis, Mendoza y San Juan. Programa Nac. de Hojas Geológicas. SEGEMAR. p:113, 1 mapa (inédito). (1999)
- Facini, J., Chiesa, J., Georgieff, S., Martínez, C., y Icazatti, F. 2021. Depósitos y procesos sedimentarios del Pleistoceno-Holoceno en el norte de la Sierra de San Luis. Argentina. XVII Reunión Argentina de Sedimentología. 14 al 18 Marzo. Paraná, Entre Ríos.
- Facini, J., Martínez, C., Icazatti, F. y Chiesa, J. 2021. El Cuaternario en una pampa de altura de la vertiente norte en la sierra de San Luis, Argentina. XVII Reunión Argentina de Sedimentología. Paraná, Entre Ríos.
- Folk, R. The petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing Co. 182 p., Austin, Texas, USA. (1974)
- Folk, R., Andrews, P. y Lewis, D. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zeland. New Zeland Journal of Geology and Geophysics 13: 937-968. (1970)
- Ramos, V. A., 1999. Las provincias geológicas del Territorio Argentino. En: Geología Argentina, R. Caminos (ed), Subsecretaría de Minería de la Nación. Servicio Geológico Minero Argentino SEGEMAR. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29, no 3 pp. 41-73. Buenos Aires.

# MODELO DE FALLA SÍSMICA APLICADO A ROTURA DE PROBETAS DE MATERIAL FRÁGIL

Dino A. Filipussi <sup>ab</sup>, Martín P. Gómez <sup>ac</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Ondas Elásticas, ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA

<sup>b</sup> Departamento de Física, ECyT, UNSAM Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

<sup>c</sup> Grupo de Emisión Acústica, FRD, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA

e-mail: [dfilipus@gmail.com](mailto:dfilipus@gmail.com)

## RESUMEN

*En geofísica se describen las fallas sísmicas, el campo de deformación de la Tierra y la propagación de ondas sísmicas con modelos matemáticos basados en principios de la teoría de la elasticidad de los medios continuos. Esta descripción permite predecir la dimensión de una falla sísmica a partir del espectro de la señal medida por un sismógrafo. El modelo geofísico establece que el espectro del campo de desplazamiento del medio material en un punto lejano del mismo presenta una frecuencia esquina como resultado del cambio en las tendencias de baja y alta frecuencia. El modelo predice también que hay una relación de proporcionalidad inversa entre la frecuencia esquina y la dimensión de la falla sísmica. En este trabajo se busca extender estos resultados a la rotura de un material frágil a escala de laboratorio siendo la emisión acústica el método adecuado para estudiar el espectro de las ondas elásticas que se propagan en la fractura. Para esto se diseñó un experimento en el cual se obtienen distintas longitudes de fractura. Probetas planas de metacrilato de metilo fueron ensayadas a la tracción aplicando la fuerza con una herramienta cónica hasta el arresto de las fisuras.*

*Palabras Clave:* Emisión Acústica, Fractura de acrílico, Longitud de fractura; Análisis espectral

## INTRODUCCIÓN

Modelos matemáticos basados en principios de la teoría de la elasticidad de los medios continuos permiten describir en geofísica las fallas sísmicas, el campo de deformación de la Tierra y la propagación de ondas sísmicas en el mismo. Estos modelos permiten predecir la dimensión de una falla a partir del espectro de la señal medida por un sismógrafo. Savage J. C., 1972; Molnar P., Tucker B. E. and Brune J. N., 1973 informan sobre estos modelos. El campo de desplazamiento en un material elástico da cuenta de la deformación de un determinado punto material, para cada instante de tiempo. El modelo geofísico establece que el espectro de Fourier del campo de desplazamiento en un medio material (en un punto lejano del mismo) presenta una frecuencia esquina como resultado del cambio en las tendencias de baja y alta frecuencia. El modelo predice también que hay una relación de proporcionalidad inversa entre la frecuencia esquina y la dimensión de la falla sísmica. En la Tabla I (Savage J.C., 1972) se presentan los resultados obtenidos para distintos modelos, donde el espectro es aproximadamente constante a baja frecuencia, decae como  $1/\omega$  en una frecuencia intermedia y decae como  $1/\omega^2$  a alta frecuencia. Las frecuencias  $\omega_1$ ,  $\omega_3$  y  $\omega_2$  corresponden a las frecuencias esquina que limitan la baja, media y alta frecuencia. Se puede comprobar que  $\omega_3^2 = \omega_1 \cdot \omega_2$ . Las longitudes  $L$  y  $W$  corresponden al largo y ancho de la falla,  $A$  al área de la falla y  $\alpha$ ,  $\beta$  son



las velocidades de propagación de la onda longitudinal (ondas P) y la transversal (ondas S) respectivamente. En la Fig. 1 (Savage J.C., 1972) se muestran los espectros del campo de desplazamiento normalizado versus la frecuencia, en una escala log-log y se indican las rectas de tendencia de baja, media y alta frecuencia.

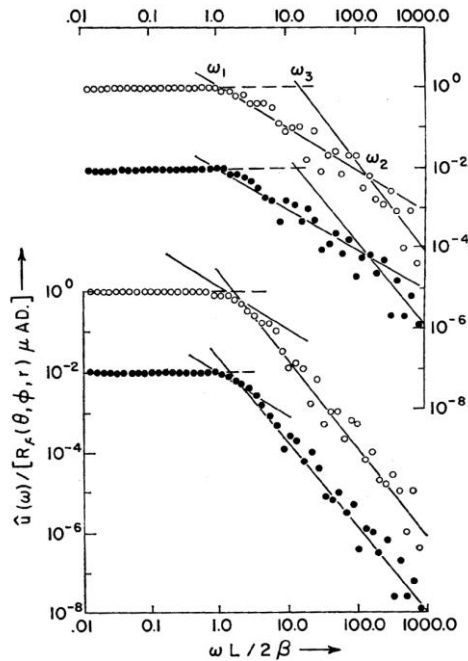
La intersección de las rectas de baja y alta frecuencia determina el valor de la frecuencia esquina  $f_c = \frac{\omega_3}{2\pi}$ .

**Tabla I.** Modelos de falla sísmica (Savage J.C., 1972)

Comparison of the Relation between Corner Frequencies and Fault Dimensions as Given by Various Fault Models

S Wave	P Wave
<i>Haskell</i> ( $v/\beta = 0.9$ )	
$\omega_1 = 3.6\beta/L$	$\omega_1 = 1.2\alpha/L$
$\omega_2 = 4.1\beta/w$	$\omega_2 = 2.4\alpha/w$
$\omega_3^2 = 14.8\beta^2/A$	$\omega_3^2 = 2.9\alpha^2/A$
<i>Brune</i> ( $L = 2\alpha$ )	
$\omega_1 = 4.7\beta/L$	$\omega_1 = 4.7\alpha/L$
$\omega_2 = (4.7\beta/L)(1.6 - 0.6\epsilon)/\epsilon$	$\omega_2 = (4.7\alpha/L)(1.6 - 0.6\epsilon)/\epsilon$
$\omega_3^2 = (17.2\beta^2/A)(1.6 - 0.6\epsilon)/\epsilon$	$\omega_3^2 = (17.2\alpha^2/A)(1.6 - 0.6\epsilon)/\epsilon$
<i>Berckhemer and Jacob</i> ( $L = 2\alpha$ , $v_{\max}/\beta = 0.9$ )	
$\omega_3 = 2.5\beta/L$	$\omega_3 = 1.5\alpha/L$
$\omega_3^2 = 5.0\beta^2/A$	$\omega_3^2 = 1.7\alpha^2/A$

$\epsilon$  is the fraction of the available stress (i.e., stress above frictional stress) released in the earthquake.



The Fourier spectra of the far-field displacement signal calculated from the Haskell model (generalized to bilateral rupture) with  $L_o = L_s$ ,  $\theta = 60^\circ$ , and  $v/\beta = 0.9$ . In the upper pair of spectra  $2T\beta/(L_o + L_s) = 0.005$  and in the lower pair  $2T\beta/(L_o + L_s) = 0.5$ ; these values would be appropriate to fault surfaces having length to width ratios  $L/w$  of 100 and 1.0, respectively. The ordinate for the P-wave spectra (solid circles) has been divided by 100 to separate the P- and S-wave spectra (open circles). The straight lines are asymptotes of slope  $\omega^{-2}$  and  $\omega^{-3}$  passing through points  $(\omega_1^*, 1)$  and  $(\omega_3^*, 1)$  for S waves and points  $(\omega_1^*, 0.01)$  and  $(\omega_3^*, 0.01)$  for P waves.

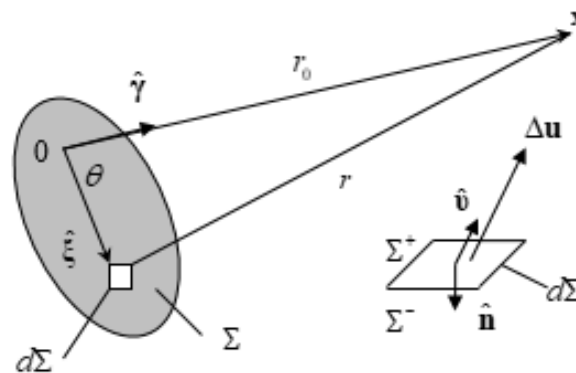
**Figura 1.** Espectro de desplazamiento para una onda sísmica (Savage J.C., 1972).

Basado en la teoría descrita por la sismología cuantitativa (Aki K. y Richards P. G., 1980), se ha desarrollado un modelo de fractura en materiales frágiles que permite

relacionar la información de la señal de Emisión Acústica (EA) con los parámetros que determinan la fuente de fractura. En este, se analizó el cambio en la forma de onda de las señales de EA con las características de la fuente y el detector (Filipussi D., Piotrkowski R. y Ruzzante J., 2012). La EA es una técnica de ensayos no destructivos (END) que estudia los fenómenos por los cuales un material sometido a algún tipo de sollicitación libera energía de manera transitoria en forma de ondas elásticas a partir de fuentes localizadas. El objetivo de este trabajo es mostrar que el modelo geofísico de falla de sísmica puede extender su rango de aplicación a distintas escalas espaciales y temporales, como, por ejemplo, para el análisis de las señales de EA a escala de laboratorio.

Describimos a continuación parte del desarrollo del modelo propuesto para la relación entre la frecuencia esquina y la longitud de fractura.

Una fractura en el interior de un material puede interpretarse como una fuente de onda elástica producida por una discontinuidad en el campo de desplazamiento del material. Esta discontinuidad se produce en una superficie en el interior del material que se denomina plano de fractura  $\Sigma$  como muestra la Fig. 2 donde  $x$  es la posición del punto campo donde es medido el campo de desplazamiento  $u(x, t)$  que da cuenta de la deformación del punto material en  $x$  para cada instante de tiempo  $t$ .



**Figura 2.** Esquema del punto fuente (fractura) y punto campo (punto de detección del campo de desplazamiento)

Aplicando el teorema de reciprocidad de la dinámica de la elasticidad encontrado por Betti (Aki and Richards, 1980) se obtiene una representación integral del campo de desplazamiento que permite calcular a éste último para una fuente de fractura como sigue:

$$u_n(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\tau \iint_{\Sigma} \Delta u_i(\xi, \tau) c_{ijpq}(\xi) n_j \frac{\partial}{\partial \xi_q} G_{pn}(x, t - \tau; \xi, 0) d\Sigma(\xi) \quad (1)$$

donde  $\Delta u$  es la discontinuidad del campo de desplazamiento,  $c_{ijpq}$  el tensor de elasticidad del material,  $n_j$  la dirección normal al plano de fractura,  $G_{pn}$  el tensor de la función de Green y  $\Sigma$  la superficie del plano de fractura.

Determinando la función de Green para la ecuación de la dinámica de la elasticidad en un medio lineal, homogéneo e isótropo se obtiene la ecuación (2):

$$u_n(x, t) = \frac{R_n}{4\pi\rho c^3 r} \iint_{\Sigma} \Delta \dot{u}(\xi, t - \frac{r}{c}) d\Sigma \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del medio material,  $c$  la velocidad de propagación de onda,  $r$  la posición del punto campo y  $R_n$  es el patrón de radiación proveniente de la fuente de fractura.

$$R_n = \begin{cases} c_{ijpq} \gamma_n \gamma_p \gamma_q \nu_i n_j & \text{onda P} \\ c_{ijpq} (\delta_{ip} - \gamma_n \gamma_p) \gamma_q \nu_i n_j & \text{onda S} \end{cases} \quad (3)$$

Resolviendo la integral de la ecuación (2) y transformando a Fourier para una fuente de fractura rectangular unidireccional y en la aproximación de campo lejano se obtuvo el espectro del campo de desplazamiento dada por la ecuación (4), donde  $\hat{u}(x, \omega)$  es la transformada de Fourier del campo de desplazamiento  $u(x, t)$

$$\hat{u}(x, \omega) = \frac{\mu U_0 A}{4\pi\rho c^3 r T} \frac{\left(\frac{\tau_0 \omega}{2}\right) e^{-\frac{j\tau_0 \omega}{2}}}{\frac{\tau_0 \omega}{2} \frac{1}{T} + j\omega} \quad (4)$$

donde

$$\tau_0 = L(1 - \eta \cos \theta) / v \quad (5)$$

es el tiempo de subida de la señal que llega al detector,  $\theta$  el ángulo de detección,  $U_0$  es el valor máximo alcanzado por la discontinuidad del campo de desplazamiento,  $A$  el área de la fractura,  $\mu$  la constante elástica de Lamé, y  $T$  el tiempo en alcanzar la discontinuidad del desplazamiento en la fractura, el 63% de  $U_0$ . Se define con  $\eta$  la relación entre la velocidad de fractura  $v$  y la velocidad de propagación de onda  $c$  como sigue:  $v = \eta c$  donde  $\eta = 0.9$  para un material frágil y  $\eta = 0.1$  para un material dúctil. Calculando el módulo de la ecuación (4) se tiene:

$$|\hat{u}(\omega)| = \frac{\mu U_0 A}{4\pi\rho c^3 r} \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left| \frac{\left(\frac{\tau_0 \omega}{2}\right)}{\frac{\tau_0 \omega}{2}} \right| \quad (6)$$

Analizando esta última expresión para un  $r = r_0$  número fijo se obtiene que para bajas frecuencias  $\omega \rightarrow 0$  el espectro en módulo es constante y vale:

$$|\hat{u}(\omega)| \sim \frac{\mu U_0 A}{4\pi\rho c^3 r_0} \quad \text{para } \omega \rightarrow 0 \quad (7)$$

y para altas frecuencias  $\omega \rightarrow +\infty$  el espectro en módulo decae como  $1/\omega^2$  obteniendo

$$|\hat{u}(\omega)| \sim \frac{\mu U_0 A}{4\pi\rho c^3 r_0 \tau_0 T \omega^2} \quad \text{para } \omega \rightarrow +\infty \quad (8)$$

El espectro así determinado muestra que la señal es constante a bajas frecuencias y luego decrece a altas frecuencias como la inversa del cuadrado de la frecuencia. La intersección de las dos tendencias a baja y alta frecuencia determina la frecuencia esquina (en este caso se corresponde con  $\omega_3$  de los modelos de falla sísmica como se mostró al principio de la introducción) y se obtiene igualando las ecuaciones (7) y (8):

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{\tau_0 T}} \quad (9)$$

Haciendo la hipótesis que el tiempo de subida de la señal detectada se corresponde con el tiempo en que aproximadamente se desarrolló la fractura  $\tau_0 \sim T$ , podemos hacer la siguiente aproximación para la determinación de la frecuencia esquina:

$$\omega_c \sim \frac{1}{\tau_0} \quad (10)$$

Reemplazando la ecuación (5) en la ecuación (10) se obtiene una relación que permitiría predecir la longitud de la fractura a partir del valor de la frecuencia esquina (determinada experimentalmente por el espectro de la señal detectada):

$$L \sim \frac{k}{f_c} \quad \text{donde} \quad k = \frac{\eta c}{2\pi(1 - \eta \cos \theta)} \quad (11)$$

Finalmente, la ecuación (11) muestra la relación inversa entre la frecuencia esquina y la longitud de la fractura. De esta ley predicha por el modelo podemos estimar el orden de magnitud de la constante  $k$  variando las distintas escalas de espacio y de tiempo. La constante  $k$  depende del tipo de material, si es frágil o no y del ángulo de detección de las señales, sin embargo se propone que esta constante es invariante a los cambios de escala y de tiempos en las distintas áreas de aplicaciones, como se muestra a continuación:

$$k \sim f_c L \sim 10 \text{ Hz} \cdot 1 \text{ km} = 10 \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad \text{para una falla sísmica}$$

$$k \sim f_c L \sim 100 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ cm} = 10 \frac{\text{km}}{\text{s}} \quad \text{para un ensayo de laboratorio}$$

El método adecuado para estudiar el espectro de las ondas elásticas que se propagan en la fractura en nuestros ensayos de laboratorio es con la técnica de Emisión Acústica (EA). Esta estudia la clase de fenómenos por los cuales se generan ondas elásticas transitorias por la rápida liberación de energía a partir de fuentes localizadas en el material. Los diferentes procesos emiten ondas elásticas que emanan de las fuentes. La mayor parte de los materiales y estructuras emiten energía en la forma de vibraciones mecánicas como resultado de cambios súbitos en su estado de tensiones inducida por una sollicitación del material. Esto es usualmente debido a fenómenos relacionados con el movimiento de dislocaciones y de propagación de fisuras que actúan como fuentes de EA. Un sensor piezoeléctrico, en contacto con el material que es monitoreado, detecta la onda mecánica impulsiva de muy baja amplitud (10  $\mu\text{V}$ ) y altas frecuencias (100 kHz a 1 MHz) y la convierte en una señal eléctrica que es amplificada y procesada por el equipo de EA (Fig. 2). La EA es generalmente de naturaleza transitoria, ocurriendo en paquetes o eventos discretos, “bursts”: explosiones, en algunos casos la señal de EA es continua. El equipo de EA procesa estos eventos analizando varios aspectos de la forma de onda asociada con cada evento, principalmente la duración, el tiempo de subida, la amplitud, el valor cuadrático medio RMS y la energía de la señal.

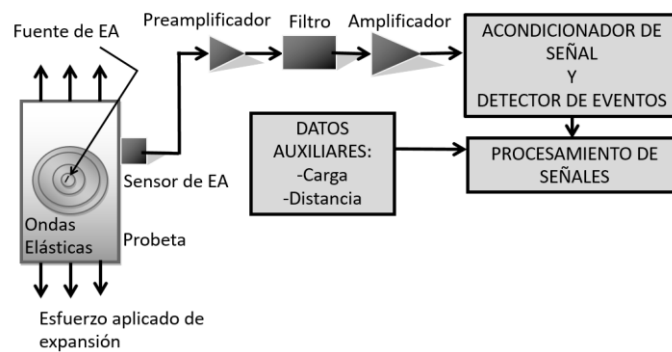
## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Nos interesará en este trabajo obtener la evolución temporal de la señal eléctrica que da cuenta de la variación del campo de desplazamiento del material en el punto de detección y luego transformando a Fourier a esta señal y graficando en la escala log-log podremos determinar experimentalmente el valor de la frecuencia esquina. Por último, se calcula el valor de la longitud de la fractura con la ley predicha por el modelo de falla. Comparando

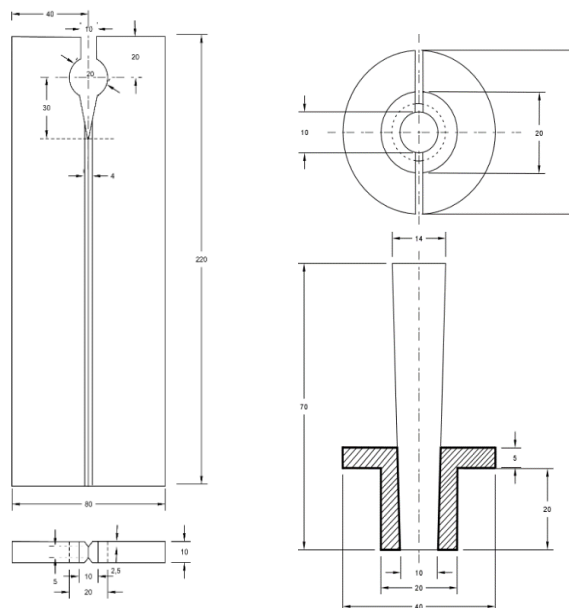
esta longitud con la medida directamente en las fracturas de las probetas se podrá ver el alcance de predicción del modelo de falla en el área de la EA.

Se efectuaron los ensayos de fractura en material frágil con una máquina de tracción y se monitoreo el ensayo con el equipo de EA. En los ensayos se aplicaron esfuerzos normales en placas planas de acrílico (metacrilato de metilo). Las placas contaban con un orificio para permitir el avance de una pieza de forma cónica accionada por una máquina de ensayo industrial de forma tal de aumentar el diámetro del orificio hasta el arresto de la fractura. A las probetas se les talló una hendidura longitudinal en su eje de simetría para favorecer el debilitamiento del material y que la fractura fuera en esa dirección. La Fig. 4 muestra un dibujo de las placas de acrílico utilizadas en los ensayos y de la pieza cónica que mediante la máquina de tracción accionaba el esfuerzo normal en las probetas.

La Fig. 5 muestra el arreglo experimental donde se observa a la probeta con la pieza cónica ya dispuesta en la máquina de tracción y la ubicación de dos sensores piezoeléctricos.

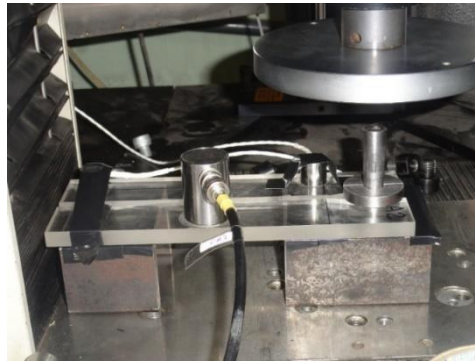


**Figura 3.** Equipo de emisión acústica. Las señales de las ondas mecánicas generadas en la fuente son convertidas en señales eléctricas por el detector piezoeléctrico ubicado en la superficie para luego ser procesadas y analizadas.



**Figura 4.** Probeta de acrílico y pieza cónica.

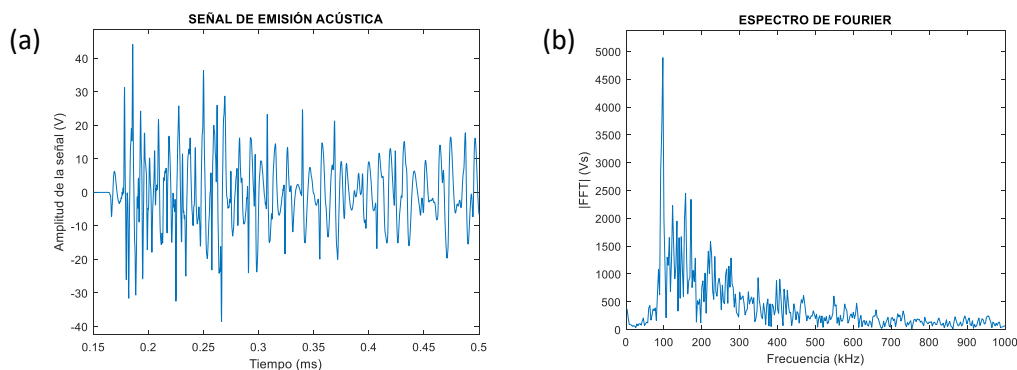
Se utilizaron tres sensores piezoeléctricos S1: WDFT 75 de banda ancha (ubicación cerca de la fractura:  $x = 5$  cm,  $y = 1,9$  cm), S2: WDFT 74 de banda ancha (ubicación lejos de la fractura:  $x = 20$  cm,  $y = 1,9$  cm), S3: R6I-60 kHz sintonizado (ubicación lejos de la fractura:  $x = 20$  cm,  $y = 1,9$  cm). La dirección  $x$  se midió en la dirección del ancho de la probeta rectangular con origen en el vértice inferior izquierdo de la Fig. 4. La ganancia se fijó en 20 dB con un umbral de 45 dB. Se trabajó con un muestreo de las señales de 5 MHz. Calibración de la máquina de tracción: patrón de 490.5 N (50 kg) mide: 492.1 N.



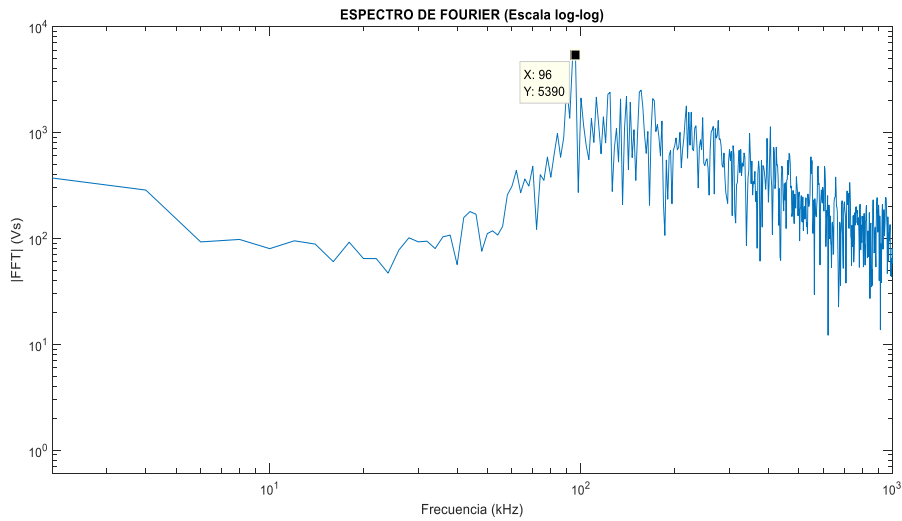
**Figura 5.** Arreglo experimental.

## RESULTADOS

Se hicieron tres ensayos para llevar a las probetas hasta el arresto de la fractura. Para cada ensayo se midió la longitud de fractura final y se las comparó con las longitudes predichas por el modelo en la ecuación (11) una vez determinada la frecuencia esquina. Para cada ensayo se determinó la frecuencia esquina del espectro de Fourier del evento principal. Se adoptó el criterio de elegir como evento principal de emisión acústica, representativo de la fractura, aquel que registró un valor mayor del parámetro de energía de la señal. La Fig. 6 muestra una señal de emisión acústica (evento principal) y el espectro de Fourier de la señal. Los valores de las constantes adoptadas en la ecuación (11) fueron: velocidad de propagación de onda  $c = 2870$  m/s (valor para el acrílico de nuestras probetas), se supuso un ángulo de detección de la señal de la fuente de fractura al sensor de  $\theta = 0^\circ$  y se ajustó el valor de la constante de fragilidad del material en  $\eta = 0.94$  considerando al acrílico como un material muy frágil. Se calculó entonces el valor de la constante de ley recíproca entre longitud de fractura y frecuencia esquina y se obtuvo un valor de  $k = 7.2$  km/s que es del orden de 10 km/s como se mencionó en la página 5.



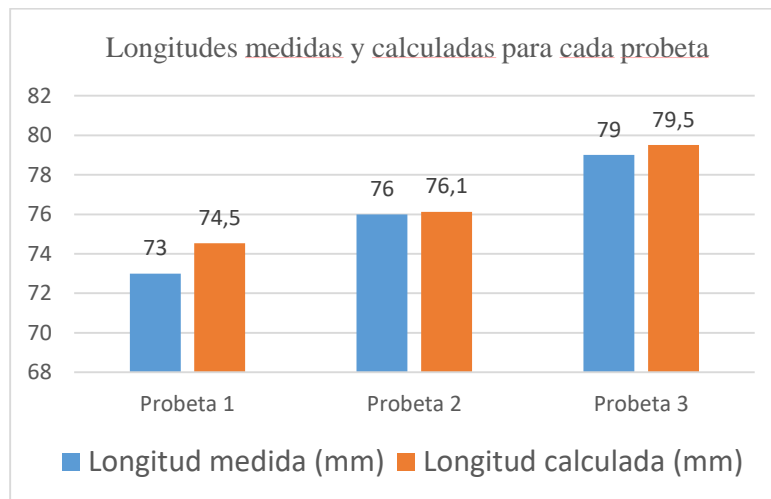
**Figura 6.** Gráficos de las señales de emisión acústica: (a) en el dominio de tiempo, (b) en el dominio de frecuencia.



**Figura 7.** Gráficos del espectro de Fourier de la señal de emisión acústica del evento principal en la escala log-log.

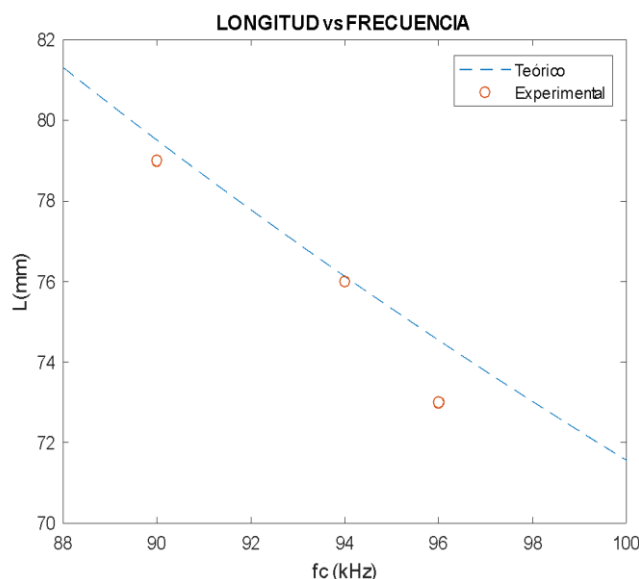
**Tabla II.** Valores medidos y calculados de frecuencia esquina y longitud de fractura.

PROBETA	Frecuencia esquina (kHz)	Longitud medida (mm)	Longitud calculada (mm)
1	96±1	73±1	74,5±0.5
2	94±1	76±1	76,1±0.5
3	90±1	79±1	79,5±0.5



**Figura 8.** Comparación entre las longitudes medidas y calculadas con el modelo de falla para cada uno de los tres ensayos.

Los resultados muestran un buen acuerdo entre los valores de longitudes de fractura calculadas y las medidas como muestran la Tabla II y la Fig. 8. La Fig. 9 muestra también un buen ajuste entre los valores experimentales y la ley teórica.



**Figura 9.** Comparación entre los valores experimentales de la longitud de fractura y frecuencia esquina medidos para cada ensayo con la curva teórica predicha por el modelo de falla.

## CONCLUSIONES

La correspondencia cualitativa entre el espectro real de los eventos que caracterizan a una fractura y el propuesto por el modelo en trabajos anteriores permite concluir que el modelo de fractura propuesto para la emisión acústica a escala de laboratorio es válido en el área de la emisión acústica a pesar que los supuestos parten de la geofísica.

La ley recíproca entre la frecuencia esquina y la longitud de la fractura se cumple para los ensayos realizados y se deberá validar con ensayos futuros en un intervalo mayor de longitudes a escala de laboratorio.

Una vez validada la ley recíproca puede aplicarse ésta metodología de trabajo para determinar el valor de la velocidad de avance de la fractura como ajuste de los datos experimentales con las longitudes de fractura medidas y calculadas.

## REFERENCIAS

- Aki K., Richards P.G. (1980). *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, California.
- Filipussi D.A. Piotrkowski R. Ruzzante J.E. (2011). “Characterization of a crack by the acoustic emission signal generated during propagation” 11th International Congress on Metallurgy & Materials SAM/CONAMET 2011, *Procedia Materials Science*, **1**, 266–272
- Filipussi D.A. Piotrkowski R. Ruzzante J.E. (2012). *Análisis de señales de emisión acústica y su relación con fuentes y sensores*, Tesis Doctoral, Universidad Tecnológica Nacional FRD, 109 pags., Prov. Buenos Aires, Argentina.
- Gómez M.P. (2015). *Fundamentos de la Emisión Acústica*, 115 pags., Buenos Aires, Argentina.
- Molnar P., Tucker B.E. and Brune J.N. (1973). “Corner frequencies of P and S waves and models of earthquake sources”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **63**, 2091-2104.
- Savage J.C. (1972). “Relation of corner frequency to fault dimensions”, *J. Geophys. Res.*, **77**, 3788-3795.



# APLICACIÓN DE SOFTWARE COMERCIAL PARA DEFINIR EL RIESGO DE LOS METALES PRESENTES EN RESIDUOS MINEROS Y PETROLEROS

José A. Gálvez<sup>a</sup>, José A. Cantero<sup>a</sup>, Lucas A. Caride<sup>a</sup>, A. Cecilia López<sup>a</sup>, Pablo Salomón<sup>a</sup> y Sergio A. Vardaro<sup>a</sup>.

*Bioprocesos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo.*

*e-mail: [jose.galvez@ingenieria.uncuyo.edu.ar](mailto:jose.galvez@ingenieria.uncuyo.edu.ar)*

## RESUMEN

*La evaluación de acciones correctivas basadas en riesgo es un proceso sistemático, cualitativo y cuantitativo, que se lleva a cabo para caracterizar la naturaleza y magnitud de los riesgos potenciales para la **salud humana y el ambiente**, a consecuencia de la exposición a sustancias peligrosas, contaminantes o agentes liberados de sitios que contienen residuos peligrosos. En base a esta evaluación se define si el sitio requiere tratamiento inmediato, a corto plazo (dos años), a largo plazo (más de dos años) o no requiere tratamiento. En este trabajo se analiza la aplicación un software de uso común en la industria petrolera diseñado para compuestos orgánicos, en donde se incorporan metales peligrosos seleccionados para definir el riesgo. Se considera un estudio en un sitio afectado por lodos de perforación (caso real) y otro en una pila de colas mineras (caso hipotético). El objetivo es evaluar el software para utilizarlo como herramienta rápida para definir el riesgo de presencia de metales en colas mineras, la peligrosidad de su migración y medidas de corrección a aplicar. En el caso particular de residuos petroleros se ha encontrado que el mayor riesgo lo proporcionan los compuestos orgánicos. En los residuos de origen minero, se estudió el efecto de un volumen importante de colas secas y se logró detectar la existencia de riesgo toxicológico para Vanadio en bajas concentraciones por debajo de la legislación de aplicación. La principal conclusión en la definición de los límites de limpieza de un suelo afectado con una cola minera seca es que se deben combinar la regulación vigente y el estudio de riesgo para la salud humana para definir las metas de limpieza del suelo en base a su uso. Estas últimas serán la menor de las dos alternativas: la legislación de aplicación y el estudio de riesgo.*

*Palabras Clave:* Metales, Evaluación de riesgo, Minería, Migración, Toxicidad

## INTRODUCCIÓN

Los residuos generados por la actividad petrolera y minera constituyen compuestos orgánicos e inorgánicos de origen natural o bien producidos por la actividad humana.

Entre los residuos petroleros se incluyen hidrocarburos, metales pesados, sales provenientes del agua de formación, lubricantes, combustibles y residuos operativos (recipientes de metal o plástico, estopas, restos de electrodos, conducciones eléctricas,

cañerías, etc). Los más peligrosos para la salud humana lo constituyen los hidrocarburos aromáticos (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) y poliaromáticos (HAP's), además de ciertos componentes de los combustibles refinados tales como los antidetonantes.

Entre los residuos de origen minero se pueden incluir metales y no metales además de combustibles, lubricantes y residuos operativos. Entre los principales podemos encontrar (Presad et al):

- Metales ferrosos: hierro, manganeso, níquel, cromo, cobalto, molibdeno
- Metales no ferrosos: aluminio, plomo, cinc, cobre y estaño.
- Minerales industriales: asbesto, barita, yeso, potasio y caolín
- Metales especiales: titanio y cadmio
- Metales preciosos: oro, plata y platino
- Materiales energéticos: petróleo, carbón, uranio

El mayor peligro de estos compuestos, además de la toxicidad es su movilidad ya que la estructura rocosa en donde se hallaban relativamente inmobilizados se ha modificado como resultado de la extracción y molienda, aumentando la superficie específica del mineral y permitiendo un incremento importante de los procesos de lixiviación. Durante la recuperación y concentración del mineral se produce una modificación de la especiación en caso de tener que realizar un proceso químico. Además, en los residuos de concentración y separación del mineral se encuentran los aditivos químicos que se utilizan para separar y concentrar el mineral (Presad et al).

Para definir su peligrosidad se puede proceder de acuerdo a la legislación vigente que para el caso del suelo en Argentina define niveles de calidad de suelo en base al uso del mismo. De acuerdo a esta definición el suelo que tenga un contaminante cuya concentración supere este nivel debe ser intervenido ya que considera que el suelo ha perdido todas o algunas de sus propiedades o bien representa una situación de riesgo tóxico o cancerígeno. Esta metodología se basa en un dato único de concentración y del uso del suelo (Argentina, Ley 24051). Por otro lado se puede plantear un proceso de evaluación de acciones correctivas basadas en riesgo en donde se considera además del uso del suelo y la concentración del contaminante, el proceso de migración y el receptor potencial (ser humano en este caso) del compuesto en cuestión (ASTM)

En este trabajo se analiza el riesgo posible de un residuo petrolero y un residuo minero mediante el uso de un software comercial de aplicación en áreas petroleras. El objetivo es analizar la posible aplicación de esta herramienta relativamente económica para el caso de la minería.

## **ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL RIESGO (ACR)**

Es un proceso sistemático, cualitativo y cuantitativo, que se lleva a cabo para caracterizar la naturaleza y magnitud de los riesgos potenciales para la salud humana y el ambiente, a consecuencia de la exposición a sustancias peligrosas, contaminantes o agentes liberados de sitios que contienen residuos peligrosos. En base a esta evaluación

se define si el sitio requiere tratamiento inmediato, a corto plazo (2 años), a largo plazo (más de 2 años) o no requiere tratamiento (ASTM).

Esta herramienta consiste básicamente en la modelización del comportamiento de la contaminación, evaluando su movilidad sobre los medios que se considere de acuerdo al caso, con el fin de determinar las concentraciones a las que estarán expuestas las personas relacionadas con el sitio evaluado. Tras calcular estas concentraciones se determinan las dosis de exposición que junto al análisis de toxicidad, se utilizan para determinar los valores residuales admisibles o Site Specific Target Levels (SSTLs) de cada contaminante

El proceso de análisis consta de tres fases que se relacionan entre sí. Se inicia con el análisis de la toxicidad del contaminante, posteriormente la migración del mismo luego el análisis de la exposición y finalmente se resumen y combinan estos resultados con el fin de estimar el riesgo derivado de la exposición.

La primera fase corresponde a la caracterización de los contaminantes y del sitio afectado. La segunda fase define y caracteriza las vías de migración del contaminante (por ejemplo lixiviación, evaporación, arrastre de polvos, transporte a través de agua subterránea, etc). La tercera fase define y caracteriza los receptores potenciales (personas) y los clasifica en tres grandes grupos: receptor residencial, receptor industrial, receptor comercial y además distingue por franja etaria (niño, adolescente y adulto).

Para llevar a cabo el análisis de riesgo se definen tres niveles crecientes en complejidad:

**Nivel 1 (TIER 1):** Se utilizan los valores medios obtenidos del monitoreo del contaminante y los consideran según su concentración o bien por su grado de peligrosidad. No es específico del sitio.

**Nivel 2 (TIER 2):** Se utilizan parámetros específicos del sitio. Se monitorean y analizan todos los contaminantes a lo largo de todas las vías de exposición.

**Nivel 3 (TIER 3):** Este Nivel incluye el desarrollo de modelos matemáticos específicos para el sitio.

Los Nivel Base de Referencia (RBLs) para suelos se calculan según el tipo de exposición de que se trate. Esto es exposición directa con el contaminante o cuando es indirecta.

Exposición Directa: Según las características particulares del contaminante, la vía más significativa de exposición a tener en cuenta es el punto de contacto o de exposición de la población humana con el agente químico, es decir la fuente de contaminación en sí misma.

Exposición Indirecta: La posibilidad de una exposición indirecta con el agente químico, se evalúa de acuerdo a las condiciones del agente químico, a las características del

suelo, a las vías de exposición, a las condiciones climáticas y de la población humana potencialmente expuesta.

El Análisis Cuantitativo de Riesgo es la herramienta adecuada para determinar las concentraciones de contaminantes que garantizan la ausencia de riesgos en cada caso concreto (en la terminología inglesa, que es frecuentemente utilizada, estas concentraciones se denominan Site Specific Target Levels o SSTLs).

## CRITERIO DE EVALUACIÓN

La metodología de la evaluación calcula la concentración máxima admisible de un compuesto a partir de la cual existe riesgo carcinogénico o tóxico conocido como SSTL (ASTM) Estos niveles se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones objetivo específicas de sitio (SSTL)

<b>Valores aceptables de riesgo para la salud</b>	<b>Individual</b>	<b>Acumulativo</b>
<b>Riesgo aceptable para compuestos cancerígenos</b>	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
<b>Cociente de riesgo aceptable</b>	1	1

Este criterio indica que hay riesgo cuando se alcanza la probabilidad de que una persona contraiga cáncer en su vida en una población de 100000 individuos. Para este criterio se utiliza la recomendación de la Organización Mundial de la Salud en la que se indica que se considera riesgosa una sustancia cuando la probabilidad de contraer cáncer pasa de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$ , es decir que 1 persona en cien mil puede contraer cáncer (ASTM).

El coeficiente de riesgo aceptable para componentes tóxicos es la relación entre la concentración de compuesto que recibe la persona y la concentración máxima a la que puede estar expuesta sin tener efectos en la salud. En base a esta definición cuando se supera la unidad existe riesgo toxicológico ya que la concentración supera el límite máximo tolerable (ASTM).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se consideraron dos residuos: el primero de origen petrolero (pileta de perforación) y el segundo una cola seca minera a la que se incluyó cianuro residual en el conjunto de contaminantes presentes.

### Caracterización de los residuos

#### Residuo de origen petrolero

Para este estudio se caracterizó una pileta de lodos de perforación. Los métodos analíticos para determinación de Hidrocarburos fueron los siguientes (Cantero et al, Von Fanestock, TPHCWG):

- Hidrocarburos totales de petróleo: EPA 418.1. Esta técnica permite detectar hidrocarburos hasta compuestos de 65 o más átomos de carbono, pero no puede identificar componentes.
- Hidrocarburos cromatografiables: TNRCC 1006, determina los hidrocarburos por fracciones en función del número de átomos de carbono. Permite cuantificar e identificar compuestos hasta 35 átomos de carbono. Discrimina entre alifáticos y no alifáticos.
- Hidrocarburos Aromáticos: EPA 5021/8260
- Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos: EPA 8270
- Metales pesados: EPA 7000B-7470-7742
- PH en suelo: ISO10390:2005 (E)
- Conductividad en suelo: Guía para el Diagnóstico de la Calidad y Salud del Suelo USDA 1999

Los resultados de la caracterización se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización del residuo petrolero

<b>Compuesto</b>	<b>Concentración mg/kg</b>	<b>Compuesto</b>	<b>Concentración mg/kg</b>
<b>TPH - Alif &gt;C05-C06</b>	1	<b>Benceno</b>	0,035
<b>TPH - Alif &gt;C06-C08</b>	26	<b>Tolueno</b>	0,17
<b>TPH - Alif &gt;C08-C10</b>	133,2	<b>Etil benceno</b>	0,061666667
<b>TPH - Alif &gt;C10-C12</b>	2231	<b>Xilenos</b>	0,6025
<b>TPH - Alif &gt;C12-C16</b>	39816,4	<b>Bario</b>	46,4
<b>TPH - Alif &gt;C16-C21</b>	117802,8	<b>Cadmio</b>	0,5
<b>TPH - Alif &gt;C21-C34</b>	157100	<b>Cobre</b>	10,6
<b>TPH - Arom &gt;C05-C07</b>	1	<b>Cromo (total)</b>	9
<b>TPH - Arom &gt;C07-C08</b>	3	<b>Níquel</b>	20
<b>TPH - Arom &gt;C08-C10</b>	13,6	<b>Plata</b>	2
<b>TPH - Arom &gt;C10-C12</b>	265,4	<b>Plomo (inorgánico)</b>	10
<b>TPH - Arom &gt;C12-C16</b>	5629,2	<b>Zinc</b>	45,4
<b>TPH - Arom &gt;C16-C21</b>	17163,4	<b>Arsénico</b>	3,82
<b>TPH - Arom &gt;C21-C35</b>	22430,4	<b>Mercurio</b>	0,1
<b>SUMA Hidrocarburos</b>	<b>362616,4</b>	<b>Selenio</b>	0,5

#### Residuo de origen minero

En el caso del residuo minero se optó realizar el estudio con la composición de una cola seca obtenida de bibliografía (Jemerich, Chaerun, Mirazimi, Lee, Kaksonen, Prasad) y a la misma se le adicionó una concentración residual de cianuro similar a la concentración

inferior de una solución cianurada para extraer oro. La caracterización se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Caracterización del residuo minero

Compuesto	Concentración (mg/kg)	Compuesto	Concentración (mg/kg)
Arsénico	50	Níquel	9,1
Boro	0,5	Plomo (inorgánico)	3,1
Bario	63,6	Antimonio	1,9
Bismuto	0,5	Selenio	5,3
Cadmio	0,5	Estaño	363,7
Cobalto	25,6	Estroncio	130,8
Cromo (total)	42,3	Titanio	888,5
Cobre	485	Talio	0,5
Manganeso	270	Vanadio	106,2
Molibdeno	12,4	Zinc	97,8
Cianuro	1500		

#### Caracterización del sitio

Se eligió un sitio cercano a un río de montaña con presencia de ganadería extensiva e instalaciones industriales. Las instalaciones industriales están a una distancia de 170 m y para la simulación con colas mineras se consideró la opción de máxima peligrosidad con la presencia de una vivienda sobre el suelo afectado. Las características del mismo necesarias para llevar a cabo la simulación se indican en la tabla 4.

Tabla 4. Características del sitio

Parámetros	Ex Pileta	Cola seca
Tipo de suelo	Limo arenoso	Limo arenoso
Profundidad techo de suelo afectado	0,0 m	0,0 m
Profundidad base de suelo afectado	1 m	2 m
Área de suelo afectado	615 m <sup>2</sup>	2500 m <sup>2</sup>
Longitud de suelo afectado paralelo a la dirección del viento	24 m	50 m
PH del suelo	7,45	9
Distancia de receptores fuera de sitio exposición por aire exterior (m)	170	170

#### Vías de migración

Para ambos casos se consideraron las vías de migración que se indican en la tabla 5.

Tabla 5. Vías de migración consideradas.

<b>Mecanismo de transporte</b>	<b>Factibilidad de ocurrencia</b>	<b>Motivo</b>
<b>Contacto dérmico e ingestión</b>	Sí	Se consideró de forma conservadora la posibilidad que receptores potenciales entren en contacto con el suelo superficial.
<b>Volatilización y dispersión hacia la atmosfera</b>	Sí	El área afectada no se encuentra aislada y se identificaron potenciales receptores en el sitio y en el entorno. La afectación se dispone superficialmente, lo que posibilita la volatilización y dispersión.
<b>Volatilización y acumulación en espacios cerrados</b>	No	No existen espacios cerrados en el sitio.
<b>Lixiviado desde el suelo afectado y transporte mediante el agua subterránea.</b>	No	No se considera contacto entre el material afectado y acuífero freático alguno a las profundidades estudiadas.
<b>Movilización de hidrocarburos disueltos a través del flujo freático.</b>	No	No se considera contacto entre el material afectado y acuífero freático alguno a las profundidades estudiadas.
<b>Erosión y dispersión eólica</b>	Sí	La afectación se dispone superficialmente, lo que posibilita la erosión y dispersión eólica.
<b>Transporte por arrastre a partir de agua de lluvia y/o superficial.</b>	Sí	Existe afectación dispuesta de manera superficial, lo que posibilita el arrastre por escorrentía.

### Receptores

En el caso de los receptores se consideró una situación específica para un campo petrolero y una situación diferente para las colas en donde se supuso la presencia de una vivienda sobre el suelo afectado. Los mismos se indican en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Vías de exposición para una piletta de perforación

<b>Vías de exposición</b>	<b>Ubicación en el sitio</b>		<b>Ubicación fuera del sitio</b>	
	Posible receptor	Factibilidad de ocurrencia	Posible receptor	Factibilidad de ocurrencia
<b>Inhalación de vapor y/o partículas en espacios exteriores</b>	Recorridor 1 Obrero de saneamiento	Sí	Recorridor 2	Sí
<b>Contacto dérmico e ingesta del suelo afectado</b>	Recorridor 1 Obrero de saneamiento	Sí	No aplica	No aplica

Tabla 7. Vías de exposición para una cola minera

Vías de exposición	Ubicación en el sitio		Ubicación fuera del sitio	
	Posible receptor	Factibilidad de ocurrencia	Posible receptor	Factibilidad de ocurrencia
<b>Inhalación de vapor y/o partículas en espacios exteriores</b>	Recorridor 1 Obrero de saneamiento	Sí	Recorridor 2	Sí
<b>Inhalación de vapor y/o partículas en espacios cerrados</b>	Personas en espacios cerrados sobre el sitio afectado	SI	Personas en espacios cerrados en el entorno del sitio afectado	SI
<b>Contacto dérmico e ingesta del suelo afectado</b>	Recorridor 1 Obrero de saneamiento	Sí	N.A.	N.A.

Software:

El análisis se realiza por cada escenario de exposición verificado mediante la aplicación del software RBCA El análisis se realiza por cada escenario de exposición verificado mediante la aplicación del software RBCA Tool Kit For Chemical Release, versión 2.6, que para el cálculo de riesgo utiliza las recomendaciones de la norma ASTM E1739 para escenarios definidos y ambos tipos matrices (suelo y agua).

Dentro del programa se seleccionaron los siguientes modelos de transporte:

- Para la modelización de la migración de vapores en exteriores provenientes del subsuelo, el método utilizado es una combinación del modelo de Jhonson-Ettinger con un modelo de volatilización desde el suelo superficial (ASTM, E1739-95). Se considerará un espesor de 1 m para definir la capa de suelo subsuperficial.
- Para la dispersión lateral de contaminantes en el aire, se considerará el modelo de dispersión Gaussiana en tres dimensiones.

Los datos de partida necesarios incluyen las propiedades químicas de los compuestos de interés y las propiedades del suelo. Este modelo considera que las características y propiedades el suelo son homogéneas horizontal y verticalmente.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la simulación se muestran en las tablas 8 y 9.

Tabla 8. Riesgo aplicado a una expileta de perforación

Vía de exposición	Riesgo Expileta	
	Carcinogénico	Tóxico
Exposición por volatilización hacia el aire exterior	NO	NO
Contacto, inhalación e ingesta de suelo afectado	NO	SI

Tabla 9. Riesgo aplicado a una cola minera

Vía de exposición	Riesgo Colas mineras	
	Carcinogénico	Tóxico
Exposición por volatilización hacia el aire exterior	NO	NO
Inhalación de vapor y/o partículas en espacios cerrados	NO	NO
Contacto, inhalación e ingesta de suelo afectado	NO	SI

Como se ve en ambos casos se puede determinar la existencia de riesgo toxicológico en ambos casos. En el caso de la pileta de petróleo el riesgo corresponde a la presencia de compuestos orgánicos en el suelo inhalado o ingerido.

En el caso de las colas se encuentra que el riesgo toxicológico es debido al vanadio. Si se compara la concentración de vanadio en la cola se encuentra que es inferior a los límites de calidad de suelo para uso residencial definidos por la Ley Nacional 24051 de Argentina. La comparación se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Comparación de las concentraciones de la cola seca, SSTL y nivel guía uso de suelo residencial

Compuesto	Concentración (mg/kg)	SSTL (mg/kg)	Nivel guía uso residencial (mg/kg)
<b>Arsénico</b>	30	$7,4 \times 10^5$	20
<b>Antimonio</b>	1,9	NC	20
<b>Boro</b>	0,5	$1 \times 10^6$	2
<b>Bario</b>	63,6	NC	500
<b>Bismuto</b>	0,5	NC	No Regulado
<b>Cadmio</b>	0,5	$>1 \times 10^6$	5
<b>Cianuro</b>	<b>1500</b>	<b><math>4,3 \times 10^3</math></b>	<b>5</b>

<b>Cobalto</b>	25,6	$3,5 \times 10^5$	50
<b>Cromo (total)</b>	42,3	$>1 \times 10^6$	250
<b>Cobre</b>	<b>485</b>	<b>NC</b>	<b>150</b>
<b>Estaño</b>	<b>363,7</b>	<b>NC</b>	<b>50</b>
<b>Estroncio</b>	130,8	NC	No Regulado
<b>Manganeso</b>	270	$2,6 \times 10^5$	No Regulado
<b>Molibdeno</b>	12,4	NC	10
<b>Níquel</b>	9,1	$>1 \times 10^6$	100
<b>Plomo</b>	3,1	NC	500
<b>Selenio</b>	5,3	NC	3
<b>Titanio</b>	888,5	NC	No Regulado
<b>Talio</b>	0,5	NC	1
<b>Vanadio</b>	<b>106,2</b>	<b>62</b>	<b>200</b>
<b>Zinc</b>	97,8	NC	500

Como se observa tanto el cianuro como el cobre, estaño, molibdeno se encuentran por encima de los límites de calidad de suelo para uso residencial, pero no acusan riesgo para la salud humana para las vías de migración y los receptores considerados.

## CONCLUSIONES

El estudio de riesgo para la salud humana permitió determinar la existencia de riesgo toxicológico para la exposición a Vanadio presente en una cola seca minera aún cuando la concentración de este compuesto es inferior al límite de calidad de suelo para uso residencial contemplada en la legislación de aplicación en Argentina

También indica la ausencia de riesgo para las vías consideradas para cianuro, cobre, estaño y molibdeno a pesar de que estos compuestos se encuentran por encima de la legislación vigente

La principal conclusión en la definición de los límites de limpieza de un suelo afectado con una cola minera seca (considerando a esta como suelo) es que se deben combinar la regulación vigente y el estudio de riesgo para la salud humana para definir el uso del suelo y las metas de limpieza del mismo.

Las metas de limpieza del suelo será la menor de las dos alternativas: la legislación de aplicación y el estudio de riesgo. En este último caso si el estudio de riesgo indica que la concentración en suelo es peligrosa para la salud humana se deberá alcanzar un nivel de limpieza del suelo suficiente para que no persista riesgo para la salud.

## REFERENCIAS

- Argentina. Ley 24051 Residuos Peligrosos. Decreto Reglamentario 831/93.
- ASTM. Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. Designation: E1739 – 95 (Reapproved 2015)
- Cantero, J; Videla, S.; Gálvez, J.; Vardaro, S.; Tettamanti, G. López, A. y Ercoli, E. Límites prácticos de biorremediación de suelos afectados por Petróleo. 6tas Jornadas De Preservación De Agua, Aire y Suelo en la Industria del Petróleo y del Gas. Neuquén. Instituto Argentino del Petróleo. (2005)
- Chaerun, Siti Khodija; Robi Suryaning Sulistyoc; Wahyudin Prawira Minwala; Mohammad Zaki Mubaroqa. Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy* 174 (2017) 29–37
- Jemeric, Sanja; Vladimir P. Beskoski; Lidija Djokic; Branka Vasiljevic; Miroslav M. Vrvic; Jelena Avdalovic; Gordana Gojgic Cvijovic; Latinka Slavkovic Beskoski; Jasmina Nikodinovic-Runic. Interactions of the metal tolerant heterotrophic microorganisms and iron oxidizing autotrophic bacteria from sulphidic mine environment 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 a smelter slag in acid solutions. *Hydrometallurgy* 159 (2016) 46–53
- Lee, Eunseong; Yosep Han; Jeonghyun Park; Jeongsik Hong; Rene A. Silva; Seungkon Kim; Hyunjung Kim. Bioleaching of arsenic from highly contaminated mine tailings using *Acidithiobacillus thiooxidans* *Journal of Environmental Management* 147 (2015) 124 -131
- Mirazimi, S.M.J., Z. Abbasalipour; F. Rashchi. Vanadium removal from LD converter slag using bacteria and fungi. *Journal of Environmental Management* 153 (2015) 144-151
- Prasad, Majeti, Campos Favas. Paulo, Maiti, Subodh: *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*. Elsevier. 2018
- TPHCWG, Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series. Vol. 3. (1999)

# EL MINIMO DE MAUNDER EN EL EXTREMO SUR DE AMERICA. ALGUNOS “PROXY INDICATORS” EN FUENTES DEL SIGLO XVII

Margarita Gascón<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Ciencias Humanas, Sociales y Ambientales, Conicet, ARGENTINA.*

e-mail: [gascon@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:gascon@mendoza-conicet.gob.ar)

## RESUMEN

*Presentamos evidencias para el sur de América de Sur del Mínimo de Maunder (que es el más reciente gran mínimo solar de los últimos 8.000 años). La reconstrucción es histórica y parte del supuesto de que los documentos y los registros de archivo contienen evidencias indirectas o proxy indicators de la actividad y ciclos solares puesto que estos interfieren con el clima del planeta, los ecosistemas y actividades de las sociedades humanas. Solamente consideramos la información extraída de fuentes documentales que se pudo cotejar con eventos reconstruidos para otras partes de nuestro planeta y con indicadores geo-cronológicos sobre paleoclima del extremo sur de América.*

Palabras Clave: Mínimo de Maunder, paleoclima de América del Sur

## INTRODUCCIÓN

El más reciente gran mínimo solar representa el nivel más bajo de actividad solar de los últimos 8.000 años y es conocido como Mínimo de Maunder (MM). Ocurrió a mediados del siglo XVII, dentro de la Pequeña Edad Glacial (Eddy, 1976; Lean et al., 1999; Zachilas et al., 2015; Inesom et al., 2015; Usoskin, 2017; Owens et al., 2017; Miyahara et al., 2021). Al igual que la Pequeña Edad Glacial (PEG) el MM fue un evento climático global que dejó evidencias de sus impactos tanto en los ambientes como en las sociedades, pues estas dependen de los ecosistemas y sus recursos. Son *proxy indicators* contenidos en registros documentales y en fuentes de archivos, y que han sido utilizados para la reconstrucción de paleoclimas (Kupperman, 1982; Landsteiner, 1999; Caviedes, 2001; Lamb, 2002; Masson-Delmotte et al., 2013; Prieto y Rojas, 2015; Camenisch and Rohr, 2018; Ljungqvist et al., 2021).

El interés del relevamiento de *los proxy indicators* del MM radica en que, a pesar de que el MM ha sido identificado en su particularidad, los más conocidos análisis históricos del clima europeo – Fagan (2002), Parker (2013) y Degroot (2018) – no diferencian los indicadores del MM sino que los consideran como indicadores de la PEG. Nuestra propuesta, en consecuencia, consiste en revisar las evidencias de los impactos del MM en el sur de América del Sur en las fuentes documentales de mediados del siglo XVII y, de esta manera, contribuir a diferenciar el MM de la PEG y aportar tanto a la historia ambiental como a la reconstrucción de los paleoclimas.

## MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

La documentación histórica y los registros en archivos contienen información indirecta sobre los ciclos solares y su actividad pues esto interfiere con el clima del planeta, los ecosistemas y el desarrollo de la vida de las comunidades animales y humanas (Beckman and Mahoney, 1998; Stenseth et al., 2002). Sin embargo, la aproximación histórica al clima ha sido acusada de severos inconvenientes metodológicos, tales como datos interpretados erróneamente, simplificaciones, escalas temporales y geográficas demasiado amplias y tendencia a enfocarse en las crisis y los colapsos (Degroot et al., 2021: 541) Asimismo, se ha señalado que los eventos que encontramos en las fuentes históricas pueden ser indicadores proxy que no se refieran ni al sol ni al clima, sino a la interacción de múltiples variables (Gallini, 2004; Moore, 2016). Consideramos que se pueden realizar investigaciones con documentos históricos y que los datos que consideramos *proxy indicators* deben contrastarse con los relevados por otras ciencias de la Tierra.

Antecedentes de los aportes históricos a la reconstrucción del clima son de larga data. Por ejemplo, aún lejos de las controversias sobre la agencia humana en las discusiones sobre el calentamiento global, en 1971 Emmanuel Le Roi Ladurie señaló que hemos registrado tanto el clima como la actividad solar (aunque indirectamente) al considerar los altibajos de los precios de los productos agropecuarios y de los alimentos, las heladas y el clima extremo, las sequías y las inundaciones, y las enfermedades y plagas asociadas al clima como las mangas de langostas o la proliferación de ratas (Florescano, 1969; Swan, 1982; Politis, 1983; García Acosta, 1988; Diaz y Markgraf, 1992; Quinn y Neal, 1995; Neto, 2006; Endfield, 2008; Herrera et al., 2011; Sandweiss y Kelley, 2012; Gascón, 2014; Otto, 2017; Leal et al. 2019, Mora Pacheco 2019, Arrijoa Díaz V., 2019; Skopyk 2020).

Tanto para la PEG como para el MM en Europa hay fuentes documentales y de archivo, escritas y gráficas. Sin embargo, para América en general y América del Sur en particular, las fuentes son escasas ya que las principales fundaciones son desde 1540 en adelante. Asimismo, había poca población y sin información previa para comparar variaciones en el clima local. La información es su mayoría cualitativa y generalmente refiere eventos extremos como sequías prolongadas ya que encarecen los precios o las lluvias que afectan la producción o vuelven intransitables las rutas. Para el extremo sur de América tenemos las fuentes documentales y de archivo referidas a la Araucanía porque fue la zona más austral con poblaciones humanas y la guerra con los araucanos tuvo cronistas e informes a las autoridades. Son fuentes que tienen dificultades en cuanto a los datos, algunos exagerados y otros incorrectos. Dada la incertidumbre, la metodología es considerar solo los eventos que puedan referenciarse con lo sucedido en otras partes o ser cotejados con anomalías registradas por métodos geocronológicos (Villagra, 1994; Masiokas et al., 2009). Seguimos la metodología utilizada por investigadores del pasado climático (Bradley y Jones, 1992; Prieto y García Herrera, 2009; Gascón y Caviedes, 2012; Bullon, 2020)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las fuentes documentales del sur de Chile contienen indicadores proxy para mediados del siglo XVII de un pico de frío que se corresponde con el MM. Para ese momento,

Geoffrey Parker (sin diferenciar la PEG del MM) señala que 1640 fue una década de pérdida de cosechas en España (92), el verano de 1641 fue registrado como el más frío de los últimos seis siglos en el hemisferio norte, el segundo invierno más frío de América del Norte (Nueva Inglaterra) y el invierno más frío registrado jamás para Escandinavia (Parker, xx). Los indicadores proxy del sur de Chile permiten seguir la propuesta hecha por Vaquero y Trigo (2014) para Europa. Ellos diferencian dos fases del MM. Hay una fase “profunda” que va desde c. 1645 a c.1700 y otra fase “extendida” comienza en c.1618 y llega hasta c.1723. La fase profunda del MM en Chile se puede correlacionar con la irrupción de viruela. Comenzando con la misma llegada de los europeos, los patógenos introducidos en América tuvieron ciclos de virulencia con diversos efectos y, aunque no lo proponemos para nuestro análisis, durante la pandemia de COVID-19, Nasirpour et. al. (2021) publicaron una investigación que asoció enfermedades virales con ciclos solares.

Siguiendo esa propuesta anterior, pensamos que la viruela de 1639 en el sur de Chile podría evaluarse dentro de este ciclo solar del MM. A nivel de su impacto en la sociedad, la viruela de 1639 fue decisiva en la capacidad bélica de los nativos, llevando a una tregua, como veremos, en la guerra de la Araucanía. Si bien el factor demográfico fue decisivo, no fue único. En esta ocasión, la pandemia estuvo acompañada por una catástrofe natural que se relaciona con el enfriamiento local pronunciado: la erupción del volcán Villarrica de 1640. Ambos eventos (la enfermedad y la erupción volcánica) ocurrieron en la fase profunda y más fría del MM señalada por Vaquero y Trigo para Europa. Subrayemos acá también que otras investigaciones han advertido sobre el impacto de los volcanes en el clima debido a la emisión de dióxido de sulfuro hacia las capas más altas de la atmósfera (Briffa et al., 1998). Una evidencia desde la glaciología del enfriamiento local es que, hacia esta misma fecha, se ha datado un avance del glaciar del Río Manso, ubicado en la misma latitud pero en la vertiente argentina de los Andes (Villalba et al., 1990).

Las dificultades explican que se acordase una tregua en las hostilidades en 1641. Se conoce como Parlamento de Quillín, aunque formaba parte de una tradición ancestral de los nativos (los *koyagtun*) que se celebraban anualmente para solucionar conflictos, explicar rivalidades y declarar la guerra, y acordar paces y matrimonios. Al final de la celebración seguían días de copiosas ingestas de alcohol (Vivar, 1966). En el *koyagtun* de Quillín de 1641 los araucanos en guerra con los españoles invitaron al gobernador de Chile, el Marqués de Baides, a celebrar una tregua. A cambio de la paz, le solicitaron alimentos como “regalos”, lo cual respondía a la crisis ambiental desatada por la erupción del Villarrica (Baides, 1642). Un testigo ocular, el jesuita Alonso de Ovalle publicó años después un interesante relato sobre el deterioro ambiental que había ocasionado la erupción. En su mirada religiosa, aquel Acto de Dios había aterrorizado a los nativos, llevándolos a aceptar la paz cristiana (Ovalle, 1646).

Otro episodio local ilustra los efectos del MM. En este caso, contamos con fuentes documentales tanto de Chile como de los Países Bajos. Se trata de la presencia en Valdivia en 1643 del explorador holandés Hendrik Brouwer, quien por el estrecho de Le Maire pasó del Atlántico al Pacífico. Quería asentar dominio holandés en el Pacífico sur, como un punto de apoyo de la ruta hacia Asia, apoyados desde el NE de Brasil que estaba en poder de los holandeses desde 1623. Tal objetivo no se pudo cumplir,

muriendo Brouwer al poco de llegar a Valdivia que permanecía abandonada por los españoles. La decisión de retirarse, explica el diario de Brouwer, fue que los indígenas les proveían de poco alimento. Le decían que era porque llovía demasiado. Al final, los navegantes holandeses se retiraron del sur chileno y nunca más intentaron volver a ocuparlo (Brouwer, 1646). Teniendo presente tal debilidad defensiva, los españoles volvieron a fortificar Valdivia y resulta una evidencia proxy que hasta 1645 enviaron notas a la capital con explicaciones por las demoras constantes. Las razones que daban eran la falta de mano de obra, la comida insuficiente y una constante implacable de tiempo lluvioso y frío (Enrich, 1891: 497)

## CONCLUSIONES

Presentamos *proxy indicators* del MM en el extremo sur de América. Debido a que se trata de una zona con poca población, salvo en Chile, la información de fuentes de archivo y documentos se refiere a la Araucanía. Esta data histórica que aceptamos como evidencia del MM fue cotejada con indicadores proxy utilizados por otras ciencias de la Tierra (dendrocronología, glaciología). Concluimos en que las fuentes documentales evidencian el MM en esta parte del planeta. Aportamos a diferenciar el MM de la PEG; algo que no encontramos en los principales textos históricos sobre la PEG en Europa. Asimismo, creemos que las fuentes documentales y de archivo, por una parte, ilustran los efectos de la variabilidad climática en las poblaciones humanas y, por otra parte, complementan la reconstrucción sobre paleoclimas que efectúan otras ciencias de la Tierra.

## REFERENCIAS

- Arrijoa Díaz Viruell, L.A. *Bajo el crepúsculo de los insectos. Climas, plagas y trastornos sociales en el reino de Guatemala (1768-1805)*, El Colegio de Michoacán, México/Univ. de San Carlos de Guatemala/Univ. Nacional Autónoma de Honduras, 2019.
- Beckman, J.E., and Mahoney, T.J. The Maunder Minimum and Climate Change: Have Historical Records Aided Current Research? *Library and Information Services in Astronomy III (LISA III)* 153: 212-217 (1998), <https://www.stsci.edu/lisa3>
- Bradley, R.S.; and Jones, P.D. *Climate since 1500 A.D.*, Routledge, London, 1992.
- Briffa, K.R.; Jones, P.D.; Schweingruber, F.H.; Osborn, T.J. Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature* 393: 450–455 (1998), <https://doi.org/10.1038/30943>
- Bullón, T. Little Ice Age, Palaeofloods and human adaptation on the Jarama River (Tajo Basin, Central Spain) from documentary proxy data. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 46(2): 497-519 (2020), <https://doi.org/10.18172/cig.vol44iss1>
- Camenisch, C., and Rohr, C. When the weather turned bad. The research of climate impacts on society and economy during the Little Ice Age in Europe. An overview. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 44(1) (2018), <https://doi.org/10.18172/cig.vol44iss1>
- Caviedes, C. *El Niño in History*. Univ. Presses of Florida, Gainesville, 2001.
- Degroot, D. *The Frigid Golden Age: Climate Change, the Little Ice Age, and the Dutch Republic, 1560–1720*, Cambridge Univ. Press, New York, 2018.

- Degroot, D., Anchukaitis, K., Bauch, M., Burnham, J., Carnegy, F., Cui, J., de Luna, K., Guzowski, P., Hambrecht, G., Htamaa, H., Izdebski, A., Kleeman, K., Moesswilde, E., Neupane, N., Newfield, T., Pei, Q., Xoplaki, E., and Zappia, N. Towards a rigorous understanding of societal responses to climate change. *Nature* 591: 539-550 (2021), <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03190-2>
- Diaz, H. R., and Markgraf, V. *El Niño. Historical and Palaeoclimatic Aspects of the Southern Oscillation*, Cambridge Univ. Press, London, 1992.
- Eddy, J.A. The Maunder Minimum. A reappraisal, *Science* 192: 1189-1202 (1976), <https://link.springer.com>
- Endfield, G. The resilience and adaptive capacity of social-environmental systems in colonial Mexico, *PNAS* 109 (10): 3676-3681 (2012), [www.doi:10.1073/pnas.1114831109](http://www.doi:10.1073/pnas.1114831109)
- Fagan, B. *The Little Ice Age: how climate made history*, Basic Books, New York, 2002.
- Florescano, E. *Precios del maíz y crisis agrícolas en México (1708-1810)*, El Colegio de México, México, DF, 1969.
- Gallini, S. Problemas de método en la Historia Ambiental de América Latina, *Anuario IEHS* 19, 141-171 (2004), <http://anuarioiehs.unicen.edu.ar>
- García Acosta, V. *Los precios del trigo en la historia colonial de México*, CIESAS-Casa Chata, México, DF, 1988.
- Gascón, M.; and Caviedes, C.N. Clima y Sociedad en Argentina y Chile durante el periodo colonial. *Anu. colomb. histo. soc. cult.* 39(2): 159-185 (2012), <https://revistas.unal.edu.co/index.php/achsc/article/view/37476>
- Gascón, M. Etnoclimatología en la Araucanía y las pampas. Clima y relaciones interétnicas entre los siglos XVI y XIX. *Dimensión Antropológica* 60: 37-60 (2014), <http://www.dimensionantropologica.inah.gob.mx/?p=118>
- Herrera, R., Prieto, M. R., and Rojas, F. Lluvias, sequías e inundaciones en el Chaco Semiárido argentino entre 1580 y 1900. *Revista de la Junta de Estudios Históricos de Santa Fe* 65: 173-200 (2011).
- Ineson, S.A., Maycock, C., Gray, L.J., Scaife, A.A., Dunstone, N.J., Harder, J.W., Knight, J.R., Lockwood, M., Manners, J.C., and Wood, R.A. Regional climate impacts of a possible future grand solar minimum. *Nature Communications* 6: 7535 (2015), [www.doi:10.1038/ncomms8535](http://www.doi:10.1038/ncomms8535)
- Kupperman, K. O. The Puzzle of the American Climate in the Early Colonial Period. *Am. Hist. Rev.* 87(5): 1262–1265 (1982), <http://doi.org/10.2307/1856913>
- Lamb, H.H. *Climate, History and the Modern World*, Routledge, London, 2002.
- Landsteiner, E. The crisis of Wine Production in Late Sixteenth-Century Central Europe: Climatic Causes and Economic Consequences. *Clim. Change* 43(1): 323-334 (1999), <https://doi.org/10.1023/A:1005590115970>
- Le Roi Ladurie, E. *Times of Feast, Times of Famine, a History of Climate since the Year 1000*, Doubleday, New York, 1971.
- Ljungqvist, F.C., Seim, A., and Huhtamaa, H. Climate and Society in European History. *WIREs Climate Change* 12(2): 1-28 (2021), <https://doi.org/10.1002/wcc.691>
- Masiokas, M.; Rivera, A.; Espizua, L.E.; Villalba, R.; Delgado, S.; and Aravena, J.C. Glacier fluctuations in extra-tropical South America during the last 1000 years. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 281: 242-246 (2009), <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.08.006>
- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, J., González Rouco, J.F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T., Osborn, T.,



- Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X., and Timmermann, A. Information from paleoclimate archives. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 383–464, editado por Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G-K., Tignor, M., Allen, S.K., Doschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Cambridge University Press, Cambridge (2013), [www.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.013](http://www.doi.org/10.1017/CBO9781107415324.013)
- Miyahara, H., Tokanai, F., Moriya, T., Takeyama, M., Sakurai, H., Horiuchi, K., and Hotta, H. Gradual onset of the Maunder Minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses. *Sci. Rep.* 11, 5482 (2021), <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84830-5>
- Moore, J.W. *Anthropocene or Capitalocene? Nature, History and the Crisis of Capitalism*, PM Press, Oakland, CA, 2016.
- Mora Pacheco, K.G. *Entre sequías, heladas e inundaciones. Clima y sociedad en la Sabana de Bogotá, 1690-1870*, Univ. Nacional de Colombia, Bogotá, 2019.
- Nasirpour, M.; Sharifi, A.; Ahmadi, M.; and Ghouschi, S. J. Revealing the relationship between solar activity and COVID-19 and forecasting of possible future viruses using multi-step autoregression (MSAR). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 38074–38084 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13249-2>
- Neto, J.L.S. Primeiras impressões dos cronistas e viajantes sobre o tempo e o clima no Brasil colônial. *Biblio 3w: revista bibliográfica de geografia y ciencias sociales* 11 (2006), <https://www.raco.cat/index.php/Biblio3w/article/view/71890>
- Otto, F. Attribution of Weather and Climate Events, *Annu. Rev. Environ. Resour.* 42: 627-646 (2017), <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060847>
- Owens, M., Lockwood, M., Hawkins, E., Usoskin, I.G., Jones, G.S., Barnard, L., Schurer, A., and Fasullo, J. The Maunder Minimum and the Little Ice Age: An update from recent reconstructions and climate simulations, *JSWSC* 7(1), A33 (2017), <https://doi.org/doi.org/10.1051/swsc/2017034>
- Parker, G. *Global Crisis: War, Climate Change and Catastrophe in the Seventeenth Century*, Yale Univ. Press, London, 2013.
- Politis, G. Climatic variations during historical times in Eastern Buenos Aires Pampas, Argentina. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 2: 133–161 (1983).
- Prieto, M.R., and Rojas, F., Determination of droughts and high floods of the Bermejo River (Argentina) based on documentary evidence (17th to 20th century), *J. Hydrol.* 529, Part 2: 676-683 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.035>
- Prieto, M.R.; and García-Herrera, R. Documentary sources from South America: potential for climate reconstruction. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 281: 196-209 (2009), <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.07.026>
- Quinn, W.H., Neal, V.T., Antunes de Mayolo, S. El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *J. Geoph. Res.* 92/C13, 14449-144461 (1987); with a reviewed in Quinn, 1992.
- Quinn, W., and Neal, V. The Historical Record of El Niño Events. En: *Climate since A.D.1500*, editado por Bradley, R.S., and Jones, P.D., 623-648. Routledge, Nueva York, 1995.

- Rind, D., Lean, J., and Healy, R., Simulated time-dependent climate response to solar radiative forcing since 1600, *J. Geophys. Res.* 104, 1973–1990 (1999), <https://doi.org/10.1029/1998JD200020>
- Sandweiss, D.H., and Kelley, A. R. Archaeological Contributions to Climate Change Research: The Archaeological Record as a Paleoclimatic and Paleoenvironmental Archive, *Ann. Rev. Anthropol.* 41(1): 371-391 (2012), [www.doi:41:371-9110.1146/annurev-anthro-092611-145941](http://www.doi:41:371-9110.1146/annurev-anthro-092611-145941).
- Skopyk, B. *Colonial cataclysms: climate, landscape, and memory in Mexico's Little Ice Age*, University of Arizona Press, Tucson, AR, 2020.
- Stenseth, N. C., Mysterud, A., Ottersen, G., Hurrell, J. W., Chan, K.S., Lima, M. Ecological effects of climate fluctuations. *Science* 297: 1292-1296 (2002), <http://doi.org/10.1126/science.1071281>
- Swan, S. Drought and Mexico's Struggle for Independence. *Environmental Review: ER* 6(1): 54-62 (1982), <http://doi.org/10.2307/3984049>
- Usoskin, I. G. A History of Solar Activity over Millennia. *Living Rev. Sol. Phys.* 14(3) (2017), <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Villalba, R. Tree-ring and glacial evidence for the medieval warm epoch and the Little Ice Age in southern South America. *Clim Change* 26: 183–197 (1994), <https://doi.org/10.1007/BF01092413>.
- Villalba, R.; Leiva, J. C.; Rubulls, S.; Suarez, J.; and Lenzano, L. Climate, Tree-Ring, and Glacial Fluctuations in the Rio Frias Valley, Rio Negro, Argentina. *Arctic and Alpine Research*, 22(3), 215–232 (1990), <https://doi.org/10.2307/1551585>
- Zachilas, L., and Gkana, A. On the Verge of a Grand Solar Minimum: A Second Maunder Minimum? *Sol. Phys.* 290, 1457 (2015), <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0684-1>

### Fuentes primarias:

- Baides, Marqués de, Diego López de Zúñiga y Velazco (1599-1656), Relación Verdadera de las Pazes que Capituló con el araucano rebelado, el marqués de Baides, conde de Pedrosa, gobernador y capitán general del reyno de Chile, y presidente de la Real Audiencia. / Sacada de sus informes y cartas y de los padres de la Compañía de Jesús, que aco[m]pañaron al real ejército en la jornada que hizo para este efecto el año pasado de 1641. Francisco Maroto, Madrid, 1642. Disponible en The John Carter Brown Library. Providence, RI. Book LCCN 43022438.
- Brouwer, Hendrick (1581 -1643)] *Jourmael ende historis verhael van der Reyse gedaen bij Costen de Straet Le Maire*, Amsterdam, 1646, Biblioteca Nacional de Chile, Fondo Sala Medina, Santiago de Chile, 1892, folios 53 - 69; Nota bibliográfica sobre el viaje de Enrique Brouwer a Chile. En: *Colección de Historiadores de Chile y Documentos Relativos a la Historia Nacional*, Tomo XLV: Los Holandeses en Chile, Editorial Universitaria, Santiago, 1923: 121-216.
- Enrich, Francisco *Historia de la Compañía de Jesús en Chile*. Rosales, Barcelona, 1891.
- Ovalle, Alonso de (1603-1651) *Histórica relación del Reino de Chile y de las misiones y ministerios que ejercita en él la Compañía de Jesús ...* Francisco Caballo, Roma, 1646; Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes, 2007, <http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmcd79b7>
- Vivar, Jerónimo de (1525-1558) *Crónica y relación copiosa y verdadera de los reinos de Chile*. Fondo Histórico y Bibliográfico José Toribio Medina, Santiago de Chile, [1558] 1966, [www.biblioteca-antologica.org](http://www.biblioteca-antologica.org), [www.memoriachilena.cl](http://www.memoriachilena.cl)

# VALORACIÓN DEL ODS661 EN CUENCAS SERRANAS, RIO SAUCE GRANDE BUENOS AIRES, ARGENTINA.

Gaspari F.J.<sup>a</sup>, Delgado, M.I.<sup>ab</sup>, y L.de Antueno<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAYF. Universidad Nacional de La Plata.  
ARGENTINA.

<sup>b</sup> CONICET, ARGENTINA

e-mail: [cuencas@agro.unlp.edu.ar](mailto:cuencas@agro.unlp.edu.ar)

## RESUMEN

*Los ecosistemas de aguas continentales son fundamentales para el logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 661 (ODS), que menciona proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos. Estos proporcionan servicios ecosistémicos cruciales, sostienen los medios de la vida y el desarrollo económico y apoyan la biodiversidad. Su capacidad para proporcionar estos servicios se ha agravado por contaminación, cambio de uso del suelo y proliferación de especies invasoras, entre otros. Los desafíos de la gestión sostenible giran en torno a encontrar el equilibrio entre el desarrollo socioeconómico a corto plazo, y proteger y restaurar los ecosistemas a largo plazo. El objetivo del trabajo es difundir el uso de herramientas para la gestión, como la Plataforma para la recolección, acceso, análisis y visualización de datos de ecosistemas de aguas continentales, respondiendo al Indicador ODS 661 (sdg661.app), que fue recientemente desarrollada por PNUMA, y es de referencia mundial. La misma expresa el cambio en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua dulce a lo largo del tiempo, focalizando en la variación del tamaño del espejo de agua. El caso de estudio son dos cuencas serranas de aporte al Dique Paso de Las Piedras, Buenos Aires, utilizando esta Plataforma, definida según Hydrosheds. Los resultados alcanzados muestran el cambio de extensión en superficie entre 1984–2019 de la dinámica al embalse, expresada por el aporte del agua permanente de la cuenca este con un 3,38% (0,29km<sup>2</sup>) y la dinámica del agua estacional en un 63,04% (0,42km<sup>2</sup>); y la norte con 2,42% (0,41km<sup>2</sup>) y 132,48% (1,07km<sup>2</sup>), respectivamente. Además, muestra el cambio estacional en la serie de tiempo intra-anual con disminución en dos periodos: entre 1997-2001 y 2008-2013, debido a cuestiones climáticas y cambio de uso del suelo.*

*Palabras Clave:* expansión en superficie, SIG, dinámica del agua dulce.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de aguas continentales son fundamentales para el logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6.6.1. (ODS), que menciona proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos. Estos proporcionan servicios ecosistémicos cruciales, sostienen los medios de la vida y el desarrollo económico y apoyan la biodiversidad. Su capacidad para proporcionar estos servicios se ha agravado por contaminación, cambio de uso del suelo y proliferación de especies invasoras, entre otros. Los desafíos de la gestión sostenible giran en torno a encontrar el

equilibrio entre el desarrollo socioeconómico a corto plazo, y proteger y restaurar los ecosistemas a largo plazo.

Los ecosistemas de aguas continentales son recursos naturales fundamentales de la biosfera, debido a que numerosas acciones de desarrollo dependen de ellos y tienen éxito o fracasan según la capacidad funcional o la integridad de los mismos. Cualquier cambio adverso en la cantidad y calidad de dichos ecosistemas reduce nuestra capacidad para desarrollarnos de manera sostenible, cambios que están contemplados a través del ODS6.6.1. Este es un indicador que hace un seguimiento de los cambios a lo largo del tiempo en la extensión de los ecosistemas relacionados con el agua, que incluye las siguientes categorías: humedales (pantanos, marismas y turberas), aguas abiertas (ríos y estuarios, lagos, aguas costeras y embalses) y acuíferos subterráneos.

La interacción entre las funciones ecosistémicas hidrológicas, el uso del suelo y el manejo del recurso hídrico es clave para el desarrollo sostenible del territorio y en el manejo integral de cuencas hídricas. Además, constituye un marco apropiado para el análisis de los procesos ambientales, generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo (Cotler y Priego, 2004), relacionando los usos de tierra y prácticas agropecuarias, para mantener la calidad y cantidad del agua (dentro de los parámetros requeridos por los usuarios de un sitio en particular), sin alterar el paisaje (Denegri and Gaspari, 2010; Rodríguez Vagaría and Gaspari, 2015).

En la actualidad el uso de modelos espacialmente explícitos es muy utilizado para entender la variabilidad geoespacial de las funciones ecosistémicas, sus servicios y las potenciales consecuencias del impacto del cambio del uso del suelo, la degradación y el cambio climático. Otorgan una valiosa herramienta para la toma de decisión a través de mapas, análisis espacio-temporal, con base en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Asimismo, generan escenarios de servicio de provisión hídrica y de retención de sedimento en función del cambio del uso del suelo y variabilidad climática (Bangash et al, 2013, Sharifi et al, 2017, Zarandian et al, 2017, Trisurat et al, 2018).

Para avanzar en el indicador 6.6.1, la ONU Medio Ambiente ha liderado el proceso desde 2015 para desarrollar una metodología de monitoreo de indicadores ([www.unwater.org](http://www.unwater.org)). Sin embargo, la recopilación de datos piloto para el indicador 6.6.1, encontró que solo el 20 % de los Estados Miembros de las Naciones Unidas pudieron proporcionar la información de un cuestionario de autoinforme. Para llenar el vacío de datos, ONU Medio Ambiente ([www.unenvironment.org](http://www.unenvironment.org)) y Google, han colaborado con el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, y han lanzado esta plataforma de ecosistemas relacionados con el agua, con el objetivo de proporcionar acceso libre y abierto a datos agregados nacionales, subnacionales, de cuencas y subcuencas sobre la extensión del agua. Las observaciones de la Tierra basadas en satélites en este sitio complementan parcialmente la vigilancia *in situ* de los países y los datos notificados a nivel nacional. En la actualidad, el emplazamiento abarca sólo partes de los componentes del indicador 6.6.1 (es decir, el cambio en la extensión espacial de las masas de agua abiertas), pero incluirá otras (por ejemplo, cantidad y calidad del agua, masas de agua naturales y artificiales, etc.) en el futuro.

En la actualidad, este explorador de ecosistemas de agua dulce disponible está desarrollado como **Plataforma geoespacial Freshwater Ecosystems Explorer** (<https://www.sdg661.app/home>), que es gratuita, libre y fácil de usar, y proporciona productos de datos para ayudar a los tomadores de decisiones a acceder a datos nacionales, subnacionales y de cuenca sobre ecosistemas de agua dulce. La misma aplica una combinación de datos de observación de la Tierra y datos terrestres para monitorear tres aspectos principales: extensión espacial, cuantificar el agua contenida en estos ecosistemas y la salud o estado de estos ecosistemas. Presenta un

enfoque de dos niveles: (1) monitoreo mundial y (2) monitoreo nacional, y cada nivel tiene una serie de sub-indicadores de los ODS. Para todos los segmentos de la metodología, se ha intentado supervisar a ambos niveles.

La información es obtenida de los satélites Landsat 5, 7 y 8 que adquieren datos de observación sobre la extensión espacial de masas de agua abiertas a nivel mundial, a una resolución de 30 m entre 2001 y 2015. De 2016 a 2030, se utilizarán satélites de mayor resolución espacial y temporal, tanto ópticos como de radar.

Los límites políticos, como las capas de unidades administrativas mundiales (Global Administrative Unit Layers-GAUL) de la FAO, se extraen del sitio de la GAUL ([www.fao.org](http://www.fao.org)). Los límites de las cuencas hidrográficas, como WWF HydroBASINS, se extraen del sitio hydroBASINS (<https://www.hydrosheds.org/>).

El objetivo del trabajo es difundir el uso de herramientas de teledetección para la gestión, como la Plataforma para la recolección, acceso, análisis y visualización de datos de ecosistemas de aguas continentales, respondiendo al Indicador ODS 6.6.1. (sdg661.app).

## MÉTODOS

El marco espacial del presente estudio fue la cuenca alta del río Sauce Grande, situada en el sudoeste bonaerense, Argentina (Fig. 1), ubicada en el contexto geológico de las Sierras Australes, que incluye al cordón de Ventania, Las Tunas y Pillahuincó. En esa zona se observan cárcavas de carácter torrencial que dan lugar a la formación de la mayoría de los afluentes, algunos permanentes y otros temporarios, que discurren en pequeños y profundos cañadones sobre las pendientes más pronunciadas. Posteriormente, se presenta la zona del pedemonte, que alcanza a áreas de menores pendientes. Por último, la unidad geomorfológica correspondiente a la llanura aluvial del río, compuesta principalmente por material sedimentario moderno con un espesor variable y pendientes más moderadas. Se destaca la presencia de barrancas (escarpas de erosión) cuyas paredes verticales y alturas variables (entre 3 y 8 m) que encajonan y controlan el cauce del río (Luque et al., 1979). La cuenca alta abastece el complejo hidráulico Embalse Paso de las Piedras, comportándose como servicio ambiental primordial para el consumo hídrico de Bahía Blanca. Presenta una superficie de 1.502,6 km<sup>2</sup>. Los cursos de agua permanentes y transitorios de mayor envergadura, favorecidos por el factor topográfico y el coeficiente de rugosidad de la cabecera podrían favorecer la actividad torrencial durante tormentas de alta intensidad en la cabecera. En la parte baja de la cuenca la rugosidad disminuye, y consecuentemente, favoreciendo la disminución de la torrencialidad de las aguas (Gaspari et al, 2012).

El caso de estudio está definido en las dos cuencas serranas principales de aporte al Dique Paso de Las Piedras, al este de menor envergadura (405,5 m<sup>2</sup>) cuyas nacientes son las Sierras de Pillahuincó, y al oeste cuya cabecera se encuentra sobre el cordón de Ventania-Las Tunas (1097,1 km<sup>2</sup>) (Fig. 2).

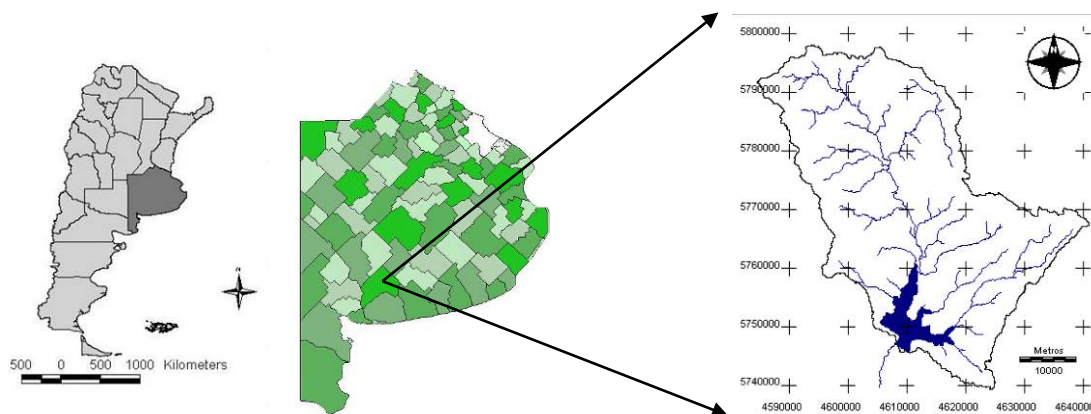


Figura 1: Ubicación del área en estudio: Cuenca alta del Río Sauce Grande.

Para la delimitación geoespacial se utilizó Hydrosheds (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales), particularmente la base de datos de cuencas hidrográficas HydroBASINS, que es una serie de capas poligonales que representan los límites de las cuencas y subcuencas hidrográficas a escala global. El objetivo de este producto es proporcionar una cobertura global sin fisuras de subcuencas de tamaño consistente y jerarquización anidadas a diferentes escalas con el apoyo de un esquema de codificación que permite el análisis de la topología de cuencas hidrográficas, como la conectividad aguas arriba y aguas abajo. En el presente caso de estudio se utilizó el Nivel 8.

Se empleó la Plataforma sgd661, la cual proporciona estadísticas que se producen de acuerdo con la metodología de seguimiento del indicador ODS, designada como indicador de Nivel 1 por el Grupo Interinstitucional de Expertos sobre los ODS<sup>1</sup>. Las mediciones de superficie de las que se informa en la plataforma se han extraído del Global Surface Water Explorer (GSWE) desarrollado por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea y Google. El análisis aplicó un algoritmo consistente a los 36 años de las observaciones de Landsat y Sentinel.

La extensión anual de cambio de superficie / transición en la Plataforma sgd661, está expresada en kilómetros cuadrados del área de agua superficial. Los mapas de transición hídrica visualizan los cambios en el estado del agua entre el primer año y el último año de observación.

Para ello, se considera que la transición de agua de la exploración global de aguas superficiales (<https://global-surface-water.appspot.com/>) se muestra como el mapa subyacente a este sitio, que expresa los cambios en el estado del agua entre el primer año y el último año de observación.

<sup>1</sup> Esta designación de Nivel 1 confirma que el indicador es conceptualmente claro, tiene estándares metodológicos establecidos internacionalmente y los datos se producen regularmente para al menos el 50 por ciento de los países y de la población en cada región.

Documenta los siguientes mapas:

1. Superficies de agua permanentes,
2. Nuevas superficies de agua permanentes (conversión de un lugar sin agua en uno de agua permanente),
3. Superficies de agua permanentes inmutables,
4. Superficies de agua permanentes perdidas (conversión de un lugar de agua permanente en un lugar sin agua),
5. Nuevas superficies estacionales del agua (conversión de un lugar sin agua en un lugar estacional del agua),
6. Superficies de agua estacionales inmutables,
7. Superficies de agua estacionales perdidas (conversión de un lugar de agua estacional en un lugar sin agua),
8. Conversión de agua permanente en agua estacional,
9. Conversión de agua estacional en agua permanente,
10. Agua permanente efímera (es decir, no hay lugares de agua reemplazados por agua permanente que posteriormente desapareció dentro del período de observación),
11. Agua estacional efímera (es decir, no hay lugares de agua reemplazados por agua estacional que posteriormente desapareció dentro del período de observación).

Estos datos fueron determinados en forma gráfica / tabular y cartográfica para las cuencas en estudio, denominadas según el código HydroBASINS en cuenca este (Código: 65190208) y oeste (Código 65190209), lo cual permitió establecer la transición de la ocupación de agua en superficie, para la Serie de tiempo entre 1984-2018.

Los datos de transición hídrica se muestran como el cambio total en la extensión del área de agua superficial permanente y estacional, medido contra un período de referencia histórico. El cambio es ganancia o pérdida mostrada tanto en porcentaje y en kilómetros cuadrados. El cambio total en la extensión del área de aguas superficiales se calculó comparando los datos de los cinco años más recientes con un período de referencia de cinco años (2000-2004).

Un análisis avanzado del agua superficial permanente y estacional se muestra en gráficos, como:

- Gráfico anual de series de tiempo (1984-presente) de la extensión del agua superficial permanente y estacional.
- Gráficos circulares que representan la medida en que el agua superficial ha pasado entre diferentes estados (es decir, la transición entre agua permanente, agua estacional y superficie terrestre), representados como ganancia o pérdida y determinados comparando el mapa de estacionalidad más reciente con el mapa de estacionalidad de referencia (utilizando el período de referencia 2000-2004).
- Gráfico anual de series de tiempo que representa las categorías de comportamiento estacional de presencia de agua, definido como tres duraciones interanuales de presencia de agua: 0-1 mes; 2-6 meses; 7-11 meses.

Para el análisis hay que considerar que:

- El agua permanente se define como presente los 12 meses del año.

- El agua estacional se define como presente menos de 12 meses al año.
- El agua nueva es un área de tierra que se ha convertido en agua.
- El agua perdida es un área de agua que ha pasado a tierra.

Por último, se estimó por medio de la Plataforma sdg661, la superficie de humedales en el periodo estudiado y reconocida en las cuencas este y oeste.

## RESULTADOS

En la Fig. 2 se muestran ambas cuencas en estudio en referencia al Dique Paso de Las Piedras.

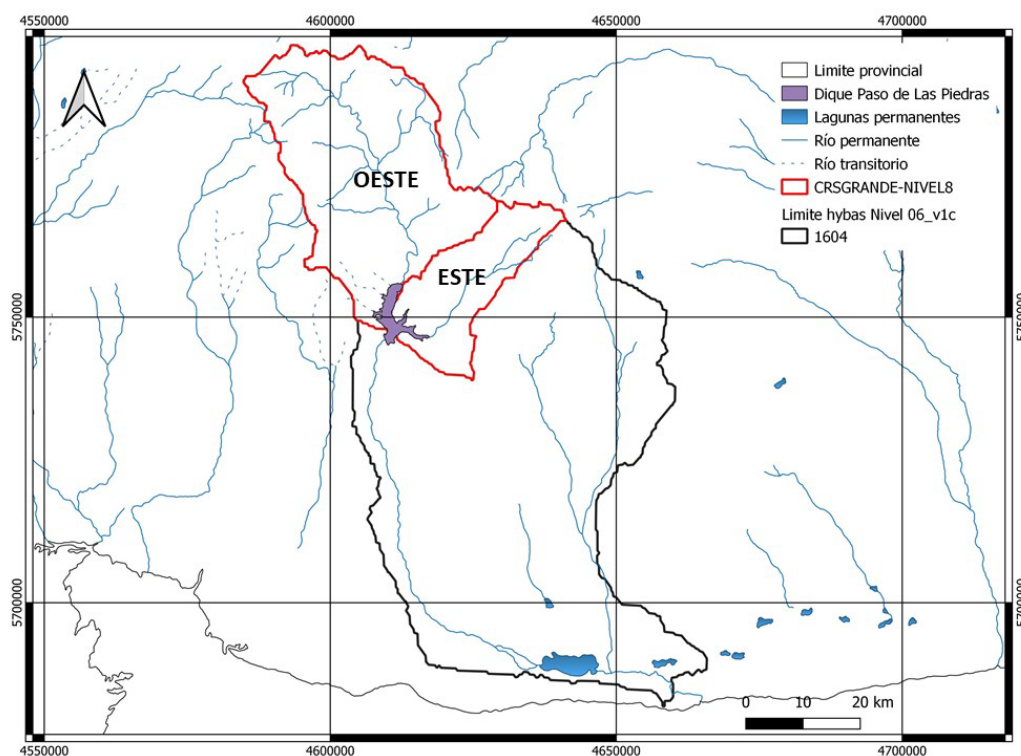


Figura 2. Denominación de las cuencas en estudio según límites HydroBASINS.

La transición de ocupación espacial del agua en el período 1984-2018, alcanzados con la sdg661, en la cuenca este, definió que la dinámica permanente cambió un 3,38 % (0,29 km<sup>2</sup>) y la dinámica del agua estacional fue de un 63,04 % (0,42 km<sup>2</sup>). En la cuenca oeste, la dinámica de agua superficial permanente mostró un cambio del 2,42 % (0,41 km<sup>2</sup>) y la dinámica estacional fue de 132,48 % (1,07 km<sup>2</sup>).

En la Fig. 3 se muestra la Serie de tiempo de la ocupación de agua en las cuencas, interpretando los cambios fundamentalmente por la ocupación en superficie del agua en los alrededores del embalse según cuenca respectiva. Además, la figura muestra el cambio estacional en la serie de tiempo intra-anual con disminución en dos períodos: entre 1997-2001 y 2008-2013, debido a cuestiones climáticas y cambio de uso del suelo.



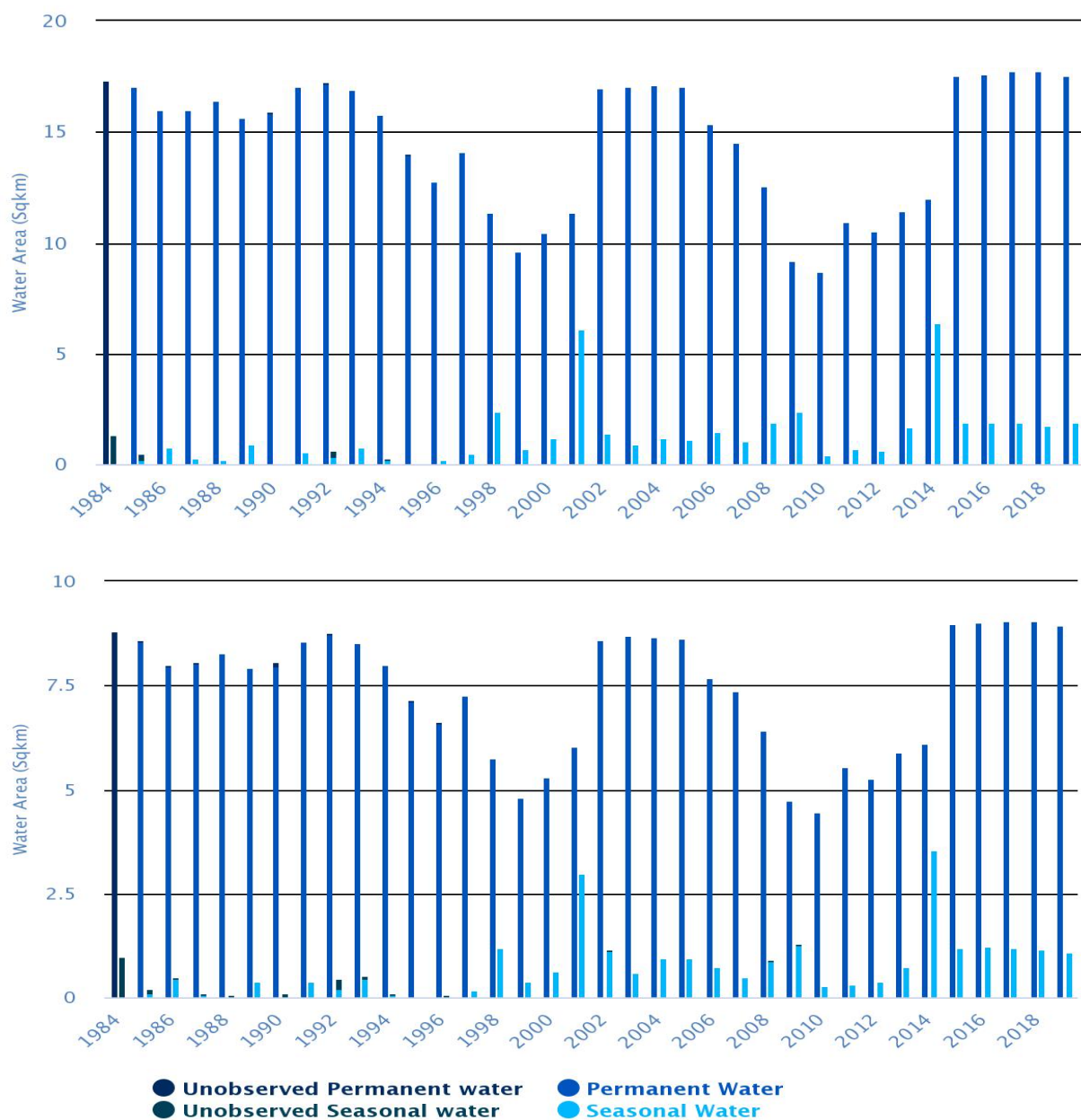


Figura 3. Serie de tiempo de la ocupación de agua en la cuenca oeste (superior) este (inferior).

En las Fig. 4 y 5 se presenta la transición de agua permanente y estacional en ambas cuencas, mostrando particularmente un área de agua nueva estacional, según la denominación de la Plataforma sdg661, que indica un área de tierra que se ha convertido en agua, es decir inundado temporalmente, siendo la cuenca oeste la que presenta mayoritariamente esta clase.

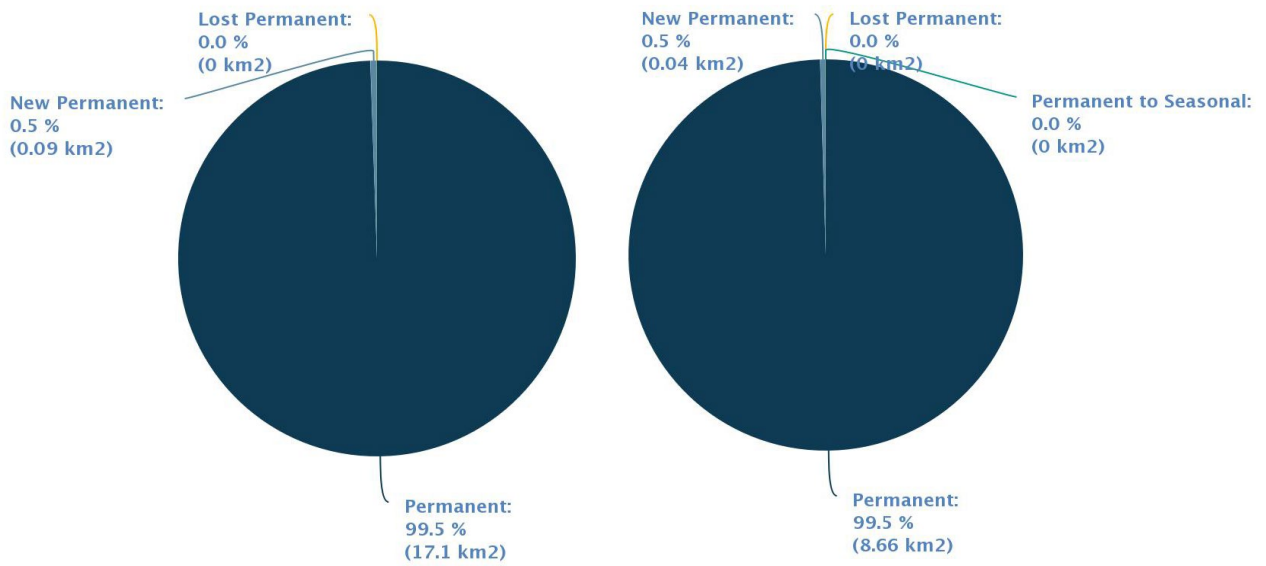


Figura 4. Transición de agua permanente en la cuenca oeste (izquierda) y la este (derecha).

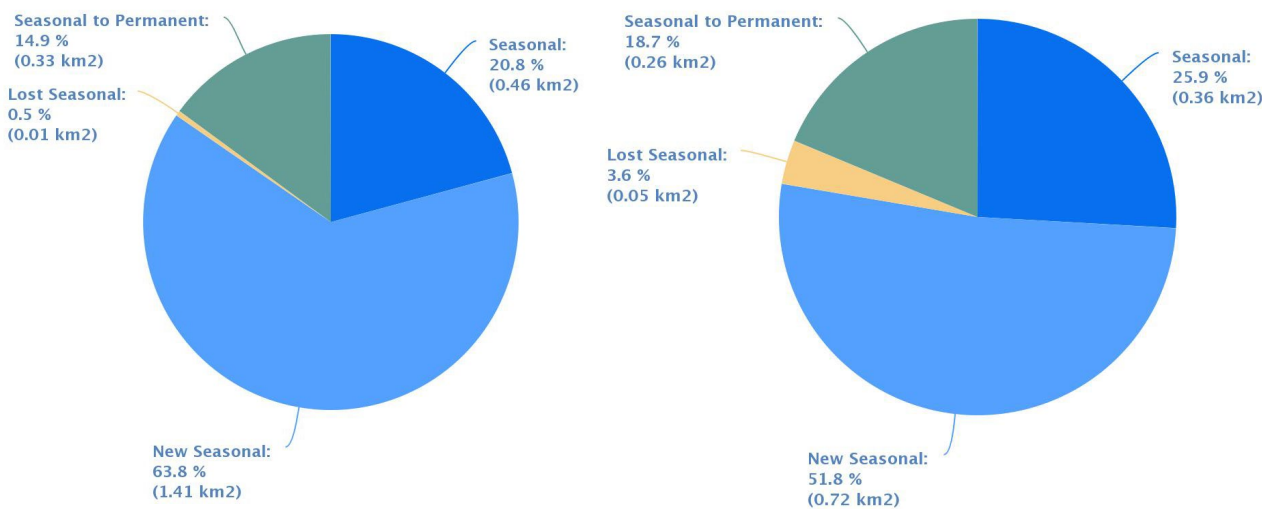


Figura 5. Transición estacional en la cuenca oeste (izquierda) y la este (derecha).

A continuación, en la Fig. 6, se representan los gráficos de la distribución anual de las categorías estacionales de presencia de agua en cada cuenca, según series de tiempo, indicando que dichas categorías de comportamiento estacional son semejantes, en relación con la presencia de agua en ambas cuencas, definido como tres duraciones interanuales de presencia de agua: 0-1 mes; 2-6 meses; 7-11 meses.

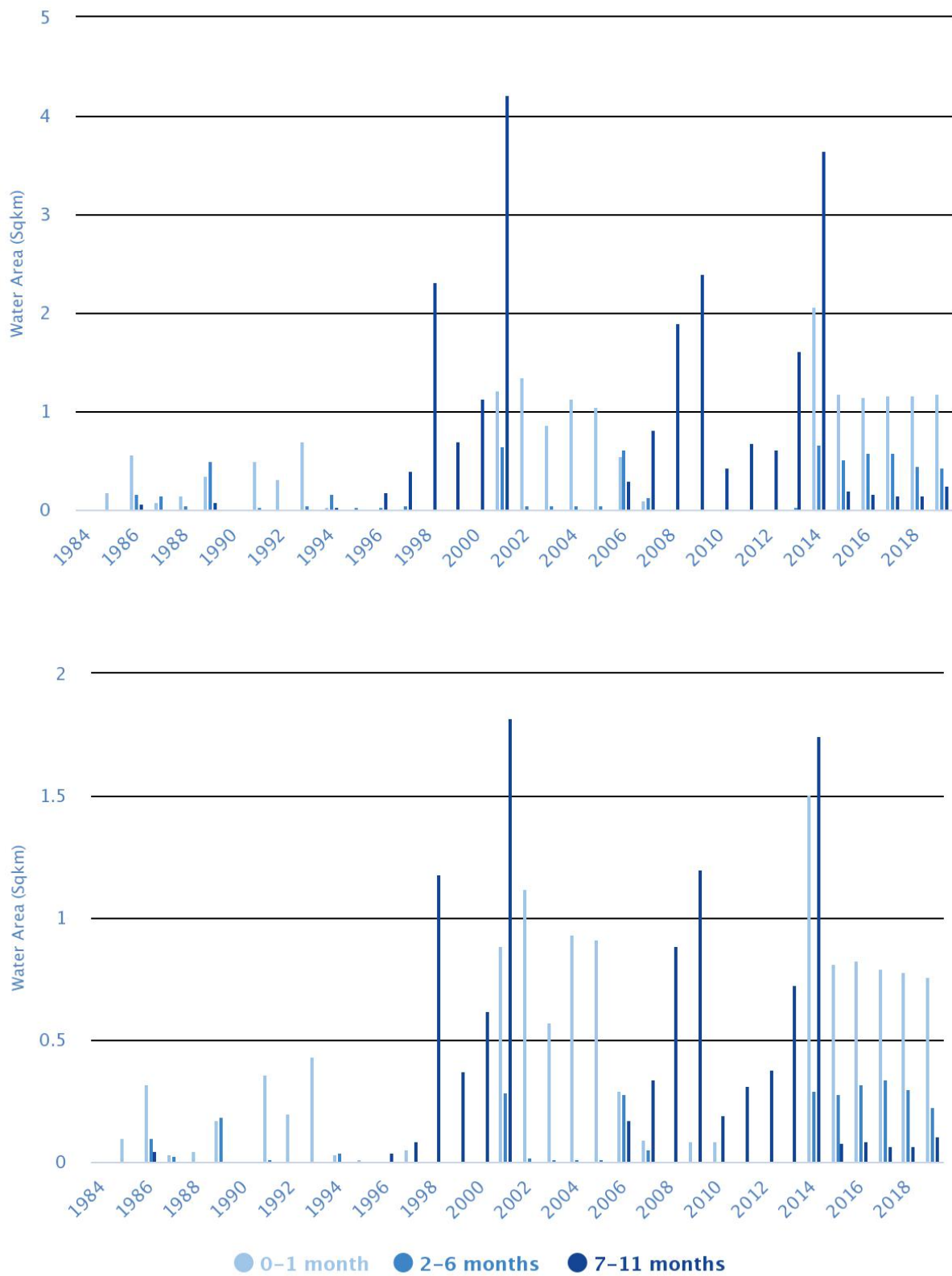


Figura 6. Categorías estacionales de presencia de agua en la cuenca oeste (arriba) y este (abajo), en unidad de superficie (km<sup>2</sup>).

Año	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
mm	968	722	780	829	743	1136	700	623	895	561	565	719	465	490
Clasificación	H	NH	NH	NH	NH	H	NH	NS	NH	S	S	NH	S	S

La Fig. 7 muestra la transición / el cambio total en la extensión del área de agua superficial permanente y estacional, en relación con el Dique Paso de Las Piedras, medido contra un período de referencia histórico. El cambio en la extensión del área de aguas superficiales se representa en colores según una leyenda explícita.

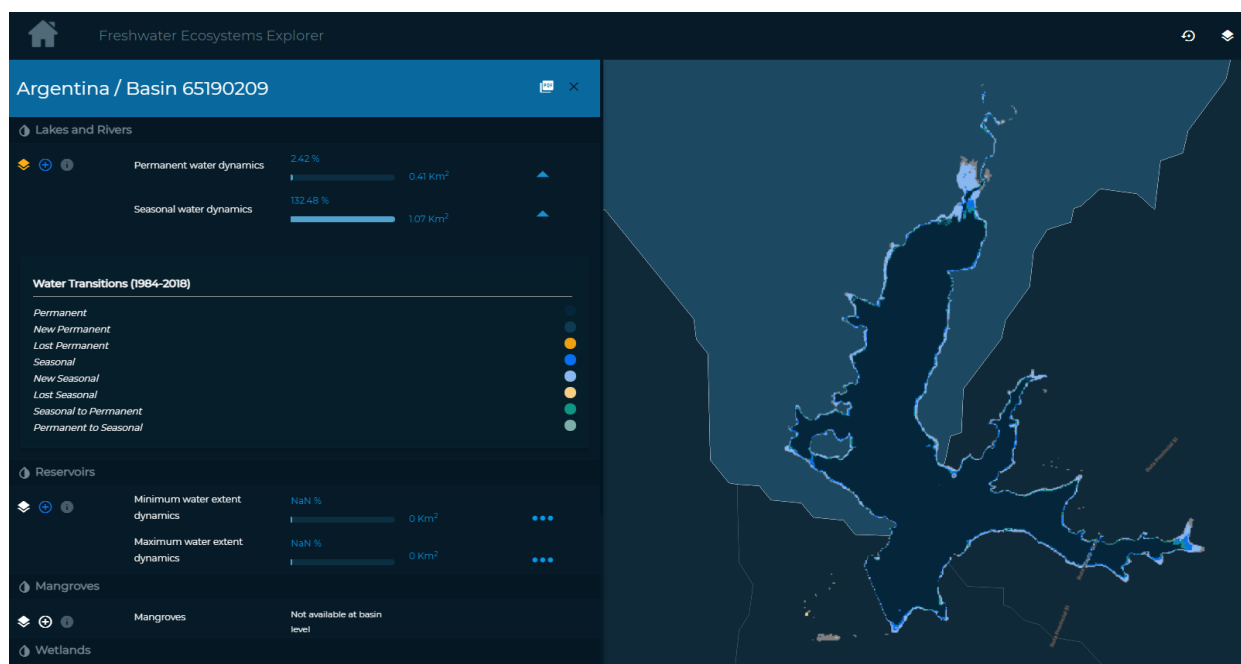


Figura 7. Categorías de transición de presencia de agua sobre el espejo de agua del Dique Paso de Las Piedras, de la Plataforma sdg661.

La Fig. 8 muestra el área total de extensión de los humedales que son datos que representan una medida de línea de base y se utilizarán para rastrear a partir de esta línea de base a medida que se actualicen en el sitio nuevas series de datos anuales sobre humedales. La superficie de ocupación de humedales es de 0,47 km<sup>2</sup> en la cuenca este y 2,35 km<sup>2</sup> en la cuenca oeste.

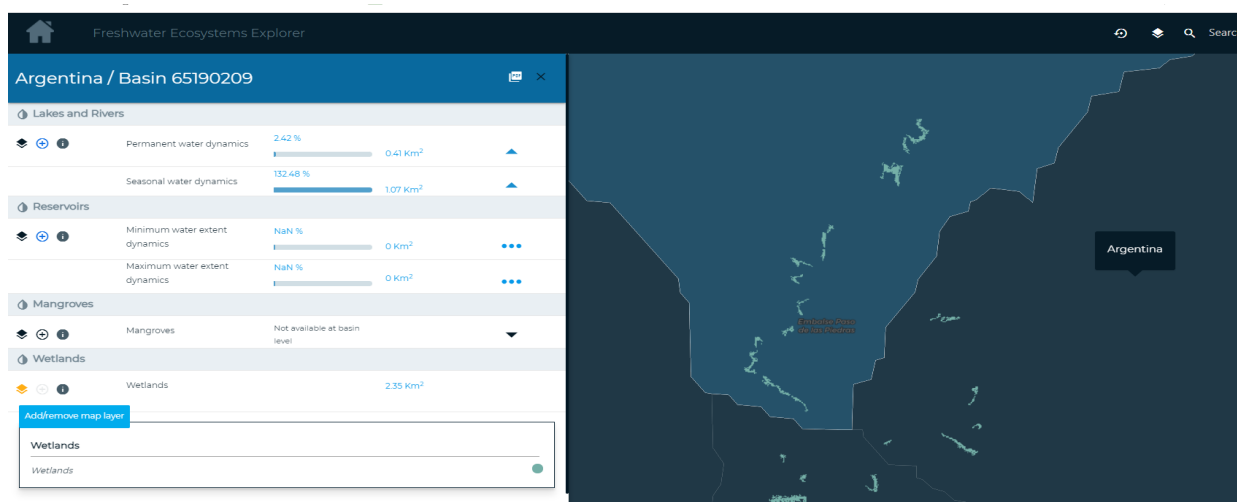


Figura 8. Distribución de humedales según la Plataforma sdg661.

## CONCLUSIONES

El uso de herramientas de teledetección, como la Plataforma sdg661, para la gestión de los recursos agua- suelo-vegetación por medio de la recolección, acceso, análisis y visualización de datos de ecosistemas de aguas continentales, respondiendo al Indicador ODS 6.6.1. (sdg661.app), permitió expresar el cambio en la extensión de dichos ecosistemas serranos a lo largo del tiempo, focalizando en la variación del tamaño del espejo de agua.

La aplicación web proporciona datos geospaciales descargables (GeoTiffs) sobre la extensión permanente y estacional del agua, y también datos descargables de series temporales nacionales, subnacionales, de cuencas y subcuencas que formarían la base para la presentación de informes oficiales sobre el indicador 6.6.1.

Por ello, la difusión del uso de esta Plataforma que, sobre la base de las imágenes de satélite acompañadas de datos estadísticos descargables y análisis de tendencias, permitirá a los países comprender los cambios que se producen en la extensión espacial de las masas de agua abiertas; identificar cuerpos de agua nuevos o perdidos, y dónde están ocurriendo cambios en los cuerpos de agua estacionales (efímeros).

Sin embargo, se recomienda en su página web que se deben evitar conclusiones arbitrarias, como la asociación de una ganancia de extensión de agua como una tendencia positiva y la pérdida de extensión de agua como una tendencia negativa sin más estudios específicos del sitio. Los datos de este sitio web deben usarse únicamente como una forma de marcar posibles áreas de preocupación que deben investigarse más a fondo. Teniendo en cuenta las condiciones únicas de cada país y los complejos mecanismos de dinámica de los ecosistemas relacionados con el agua, se necesita más información de apoyo para interpretar los datos correctamente y tomar decisiones de manera integral.

Por último, se concluye que el uso de la Plataforma sdg661 es beneficioso para la toma de decisiones informadas sobre los cuerpos de agua, y conduce a la colaboración y el aprendizaje entre países.

## AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por los proyectos denominados: “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, Proy.Nº11/A286. Período: 2016-2019, y “Lineamientos Generales para la Planificación en Cuencas Hidrográficas preservando los servicios hidrológicos ambientales”. Proy.Nº11/A387 Período: 2020-2024, ambos Proyectos I+D dirigidos por Dra. Fernanda Gaspari, correspondiente al Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaría de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación, Argentina.

## REFERENCIAS

Bangash, R. F., Passuello, A., Sanchez-Canales, M., Terrado, M., López, A., Elorza, F. J. & Schuhmacher, M. 2013. Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 458, 246-255.

Cotler, H. & Priego A.. 2004. El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: caso de la cuenca Lerma-Chapala. SEMARNAT-INE. Pp 79-89.

Denegri, G. A.& Gaspari. F. J. 2010. Lineamientos para la formulación de pagos por servicios ambientales. Estudio de caso: Alta cuenca del Río Sauce Grande. Argentina. *Revista Cuadernos Geográficos*. Universidad de Granada. 46: 93-110.

De Antueno, L., Gaspari, F. J., & Guaraca, A. G. (2020). 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-Environmental Studies Journal*, 8(1), 20-42.

Gaspari, F.J.; Rodríguez Vagaría, A.M.; Senisterra, G.E.; Denegri G.A.; Delgado, M.I. & Besteiro S.I.. 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del Río Sauce Grande. *Revista AUGMDOMUS*. Revista Electrónica del Comité de Medio Ambiente de AUGM. Asociación de Universidades del Grupo Montevideo. La Plata. Argentina. Vol 4: 143-158. ISBN 1852-2181. Con referato. Disponible en <http://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476/505>.

Luque J.A., Paoloni J.D. & Bonorino G.A.. 1979. Estudio geológico e hidrogeológico de la cuenca del Río Sauce Grande. Publicación interna del Departamento de Ciencias Agrarias y de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional del Sur, Serie Hidrología. Bahía Blanca, Argentina: 3: 64 p

Rodríguez Vagaría, A. & Gaspari F.. 2015. Estimación de la admisibilidad de pérdidas de suelo por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*. Vol. 56(1), 105-119. ISSN: 1012-1617. Con referato. <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/40100/1/articulo6.pdf> .

Sharifi, A., Yen, H., Boomer, K. M., Kalin, L., Li, X., & Weller, D. E 2017. Using multiple watershed models to assess the water quality impacts of alternate land development scenarios for a small community. *Catena*, 150, 87-99.

Trisurat, Y., Aekakkararungroj, A., Ma, H. O., & Johnston, J. M. 2018. Basin-wide impacts of climate change on ecosystem services in the Lower Mekong Basin. *Ecological research*, 33(1), 73-86.

Zarandian, A., Baral, H., Stork, N. E., Ling, M. A., Yavari, A. R., Jafari, H. R., & Amirnejad, H. 2017. Modeling of ecosystem services informs spatial planning in lands adjacent to the Sarvelat and Javaherdasht protected area in northern Iran. *Land Use Policy*, 61, 487-500.

# **ANALISIS DEL RIESGO DE COLAPSO DE VIVIENDAS DE UN SECTOR D LA CIUDAD DE LA PUNTA, SAN LUIS, ARGENTINA, PREVENCIÓN ANTE ESCENARIOS CLIMATICOS PREVISTOS PARA LA REGIÓN.**

Héctor D. Gómez <sup>(a)</sup>, Brian L. Muñoz<sup>(a)</sup>

*Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, Argentina.*

*e-mail: [hdg2010@gmail.com](mailto:hdg2010@gmail.com)*

## **RESUMEN**

*Los asentamientos de terrenos ocurridos recientemente (2020-2021) en el sector centro-oeste del complejo urbanístico “La Punta”, San Luis (CULP) posterior a la ocurrencia de lluvias extraordinarias con afectación de mampostería, hace necesario estudiar la zona desde el punto de vista ambiental y del riesgo asociado, teniendo en cuenta las tendencias climáticas futuras para la región y los diferentes escenarios previstos. El CULP se encuentra en el sector pedemontano de las Sierras de San Luis, en el sector correspondiente al faldeo Occidental ubicada a 15 km. al Norte de la ciudad de San Luis en la provincia homónima. El área de análisis es susceptible a la ocurrencia de eventos naturales súbitos episódicos de carácter aluvional. La concentración del flujo de los nuevos cursos de agua generados por la creciente urbanización en la parte superior de la cuenca, sumado a la falta de protección de los cauces naturales y las evidencias en el terreno nos hace presuponer la existencia de un asentamiento diferencial producto de la falta o mala compactación de los terrenos y de la ausencia de la gestión territorial del paisaje. Esta zona se encuentra en una microcuenca generada a partir del cambio de la pendiente local en donde se conjugan distintos factores y que genera concentración del flujo y reactivación de cursos fluviales antiguos. Esta combinación a la que se le suma el aumento de la precipitación media prevista para los años 2030,2046 y 2065 desde un 5 % hasta un 15%, resulta favorable para la profundización del problema y riesgo asociado ante estos fenómenos. El objetivo de este trabajo es dar a conocer los avances obtenidos a través del procesamiento de información digital utilizando técnicas de teledetección y Sistema de Información Geográfico (SIG). Estas técnicas de estudio nos ayudan a entender la problemática existente en torno al RIESGO a las que están sometidas las viviendas.*

*Palabras Clave:* Cambio Climático, Riesgo, Colapso, adaptación, escenarios climáticos



## INTRODUCCION

### Objetivo

El objetivo principal es el de dar a conocer los avances obtenidos a través del procesamiento de información digital utilizando técnicas de teledetección y SIG, la sistematización de la información en torno a la problemática aparecida en el periodo de verano del año 2021 en el sector-oeste del complejo urbanístico denominado “La Punta” (CULP), y que sirva de base para futuros estudios que ayuden a la gestión y solución de problemáticas similares.

El hundimiento en los terrenos de las viviendas con afectación de mampostería (Fotografías 1) de caracterices importante hace necesario la valoración de la zona desde el punto de vista ambiental el estudio del riesgo (peligrosidad, vulnerabilidad) teniendo en cuenta las tendencias climáticas futuras y el análisis de los diferentes escenarios climáticos previstos para la región. Para ello utilizaremos softwares y complementos de Qgis, Grass GIS, SAGA y productos satelitales multiespectrales y MDT (Modelos Digitales del Terreno).



Fotografías 1: imágenes de algunas de las viviendas afectadas a) y d) vista de dos paredes medianeras, el aspecto de deformación producto del hundimiento b) y c) problemas de colapso de suelo e) vista de corrimiento del suelo en el interior de una vivienda con rotura de cerámicos f) Aspecto de colapso en el sector de frente

### Ubicación del área de estudio

El área de análisis tiene una superficie de 34 hectáreas y se encuentra en el sector centro-oeste del complejo urbanístico la punta (CULP), más precisamente en los barrios denominados 900 y 600 viviendas. (Figura 1)

Esta nueva ciudad donde el gobierno provincial comenzó su construcción en el

año 2003 y se constituye como la primera nacida en el siglo XXI. Este nuevo complejo urbanístico desde el año 2012 denominada como “Ciudad de la Punta”, se encuentra en el piedemonte occidental del frente de levantamiento de las Sierras centrales de San Luis (SCSL) y está ubicada a 15 km al norte de la ciudad de capital de San Luis, a ella se puede acceder desde la ciudad de san Luis por la autopista provincial 25 de mayo con cuatro accesos en diferentes puntos de la ciudad que se encuentra a tres kilómetros hacia el oeste por cualquiera de ellos o por la ruta nacional Nro.146 que pasa a 3 km hacia el oeste de la mencionada ciudad a la cual se accede por el boulevard de las cañadas (Figura 1).

## CARACTERISTICAS GENERALES

### Geología

El área de estudio comprende el sector de piedemonte medio a distal comprendiendo una unidad de abanicos aluviales cuaternarios compuestos de sedimentos fluviales provenientes del macizo montañoso de las sierras centrales de San Luis (SCSL), del cual se derivan las aguas de las distintas cuencas hídricas que drenan la región. La SCSL puede esquematizarse en un bloque montañoso alargado peneplanizado, fracturado y con presencia de vulcanismo cenozoico (Urbina et al .2009). En cuanto a la geología este bloque es principalmente integrado por basamento cristalino compuestos por rocas ígneas y metamórficas de edad eopaleozocia (Gordillo y Lencinas, 1972, Sims et al. 1998, Steenken et al. 2010, Morosini et al 2021). Sobre el occidente un bajo de naturaleza estructural (bajo De las Salinas del Bebedero) recibe los aportes hídricos del conjunto de arroyos que se desprenden de la SCSL. Este bajo se encuentra invadido por sucesivas capas de sedimentos aluviales que son el producto de una secuencia variable de pulsaciones climáticas que imprimieron sus características en la granulometría y en la geometría deposicional de las capas.



Figura 1: Ubicación del área de estudio

## **Geomorfología**

La geomorfología que enmarca el sector de interés está determinada por un sector de abanico aluvial de un sector medio a distal y por un bloque montañoso elevado, fracturado y basculado asimétricamente hacia el Este. Un sector de la planicie distal de pendiente suave define el flanco oriental de la unidad negativa que conforma la cuenca de la Salina del Bebedero, la parte más baja de la depresión intermontana. Hacia ella apunta el plano inclinado del margen pedemontano de la sierra, área donde se encuentran las viviendas afectadas. Estas tres unidades, sierra, piedemonte y bajo brindan el marco general que sirve de escenario a eventos morfodinámicos de diversas características y niveles de energía.

## **Clima**

El clima de la zona analizada es del tipo templado subhúmedo serrano en transición a semiárido de las planicies. La sierra de San Luis constituye una barrera que separa dos regiones muy diferentes en cuanto a precipitaciones, ya que separan las zonas húmedas orientales de las áreas áridas y semiáridas occidentales. También su altura incide drásticamente en las temperaturas, provocando una disminución en las mismas. La temperatura media anual es de entre 16-20 °C, con 24-28 °C en enero, 12-16 °C en abril, 8-12 °C en julio y 16-22 °C en el mes de octubre. (REM San Luis). Las precipitaciones medias se encuentran en el orden de los 500-700 mm anuales, con medias de enero de entre 60-100 mm y 40-80 mm en octubre, con sub-zonas de montaña con anomalías de 80-120 mm. (REM San Luis).

## **Hidrología**

La divisoria de aguas principal de la zona de interés recorre la alta cumbre de la sierra central de San Luis, en ella una serie de cuencas, en ocasiones elongadas, separados entre sí por cordones secundarios transversales, definen diferentes subcuencas que desaguan hacia el Oeste en forma de canales principales. Esta zona en particular comprende el sector "C" de la caracterización morfométrica de las cuencas en la ladera occidental (Aranda, Ojeda, 2014), y se caracteriza por cuencas que no superan los 2Km<sup>2</sup>, elongadas en sector meridiano paralelas a la ladera serrana, desarrolladas sobre rocas graníticas y que se caracterizan por interfluvios sub-redondeados y drenaje sub-dendritico.

La dinámica de las aguas superficiales es de carácter estacional y asume características de torrencial, tanto en la porción alta como media de las cuencas, tornándose menos violenta a medida que se ensanchan los valles y decrece la pendiente. Aguas abajo, si bien los canales principales definen el curso ordinario de las aguas estivales, los excesos hídricos se dispersan lateralmente, superando la cota de los márgenes y abriéndose de modo radial en abanicos aluviales que se han ido superpuestos sucesivamente en una rampa de escasa pendiente, superponiendo a los primitivos derrubios gravitacionales.

## METODO O DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Materiales utilizados

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron Imágenes satelitales landsat7 1987, DEM (O MDT) Alos Palsar de 12,5 mts de resolución, DEM (Digital Elevation Models) de 5 mts de 0,20mt de resolución generado por vuelo Aero fotogramétrico, del Instituto Geográfico Nacional año 2014.

A su vez se procesaron con el software QGIS y el complemento de GRASS (Cuadro 1)

Productos obtenidos utilizando QGIS y GRASS
✓ Obtención de red de drenaje previa a la construcción de la ciudad de la punta
✓ Obtención de la red de drenaje a partir del DEM de 5 mts.
✓ Obtención de curvas de nivel para DEM de 5 mts
✓ Delimitación de las cuencas hidrográficas
✓ Mapa de pendientes
✓ Determinación de buffer para un incremento en las precipitaciones de 3%, 5 % , de15%.

El análisis del terreno antes de la fundación del CULP, la red de drenaje y la vegetación se constituyó en el **primer paso** de análisis de la información, donde esta etapa involucro la utilización del complemento GrassGIS para delimitar cuenca y obtener red de drenaje existente antes de la construcción de esta ciudad. El **segundo paso** fue la determinación de los parámetros morfométricos, para ello se utilizaron herramientas de GrassGis, QGIS. El **tercer paso** se centró en el análisis de procesamientos de DEM en donde se obtuvieron curvas de nivel, pendiente del terreno, donde se utilizó QGIS. **El cuarto y último** paso consistió en el análisis de la información y las proyecciones en función de los escenarios climáticos previstos para esta zona.

### Desarrollo del trabajo

Para el desarrollo de estos estudios se contó con series de imágenes satelitales temporales LANDSAT. Estas imágenes proporcionaron una visión retrospectiva del área en alta y mediana resolución.

Los análisis comparativos de carácter temporal empleando imágenes de diferentes fechas permiten advertir cambios destacados que están ligados a realización del complejo urbanístico La Punta, en detrimento del ambiente.

Mediante la utilización de GRASS, con el Modelo digital de elevación (DEM) de 30 metros se permitió establecer la red de drenaje previa a la construcción de las viviendas (Fig. 2).

En ella se observa el desarrollo de líneas de flujo en la zona de análisis concentradoras de los drenajes superficiales de la parte superior de la cuenca.

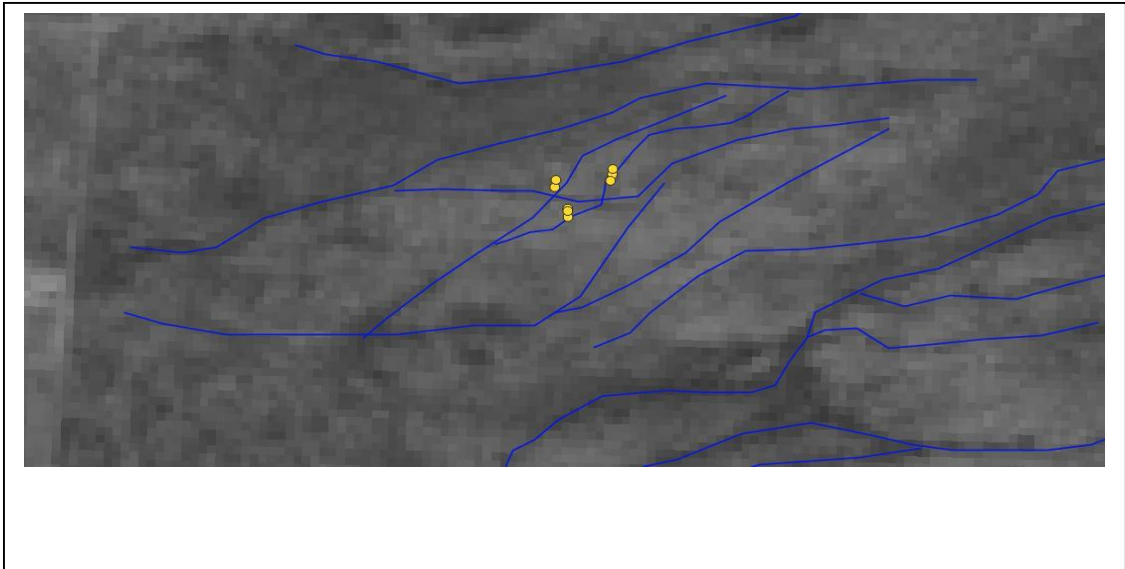
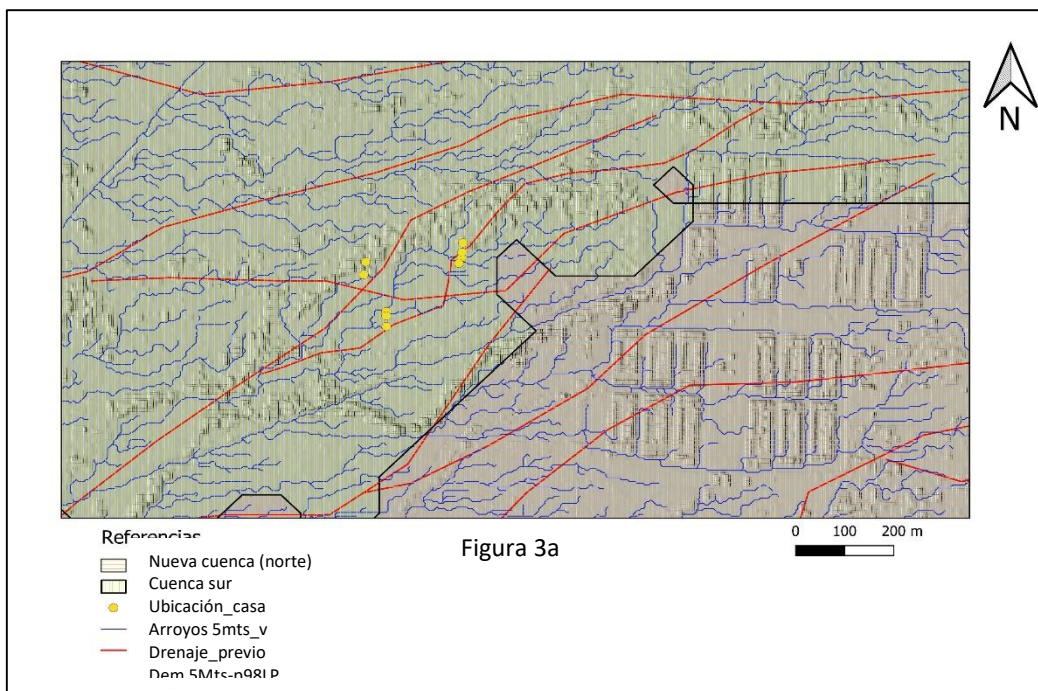


Figura 2: Drenaje previo a la construcción de las viviendas y zonas afectadas. (año 1987)

Las curvas de nivel obtenidas del DEM de 5mts del relevamiento aerofotogramétrico generado por el IGN nos permite observar que se sobrepone al drenaje preexistente, líneas rojas, (Fig. 3 a) el desarrollo de una NUEVA microcuenca (Fig. 3 b).



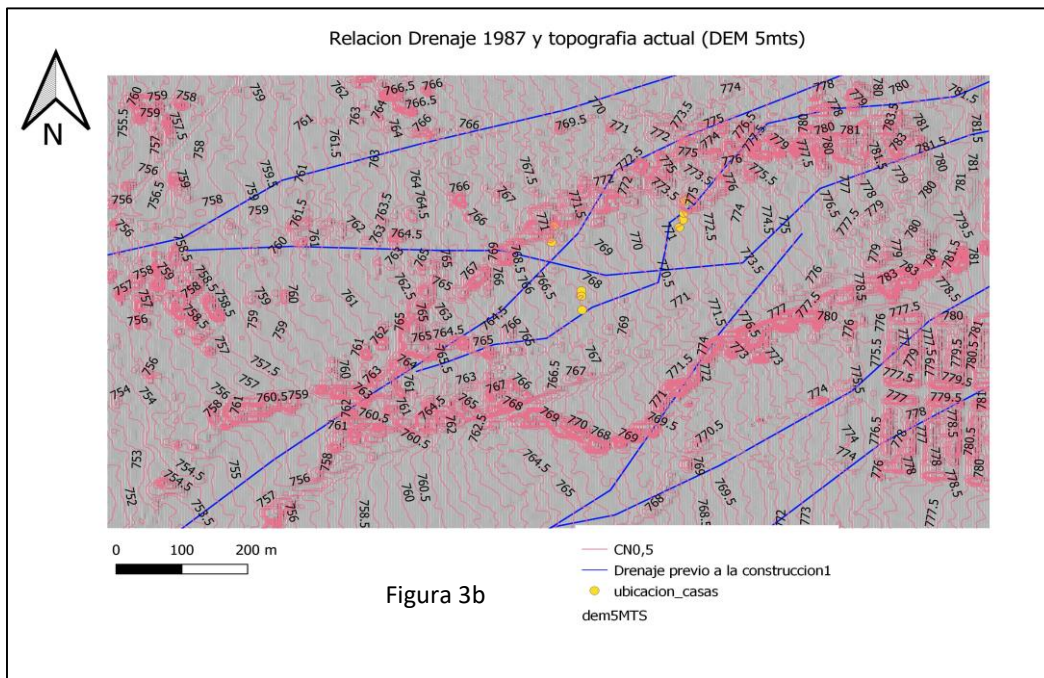


Figura 3 a: Drenaje preexistente en la zona. b) nueva cuenca generada en el área

Esta nueva cuenca generada por una mala nivelación a lo que se les suma los nuevos elementos presentes en el terreno aguas arriba de la zona de estudio (viviendas y otros elementos edilicios) con los que se combina, controlan el drenaje superficial actual con un diseño diferente al preexistente con el agravante que concentra el flujo en la zona afectada (Fig. 4). Esta situación ha potenciado la reactivación de las antiguas cárcavas que existían en la zona.

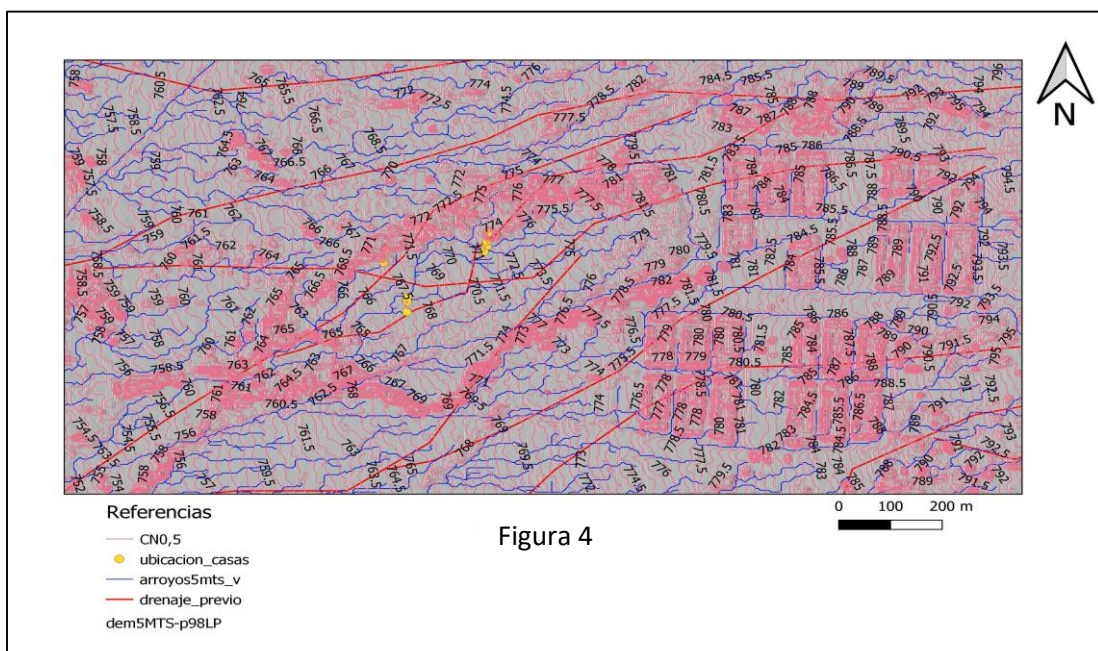


Figura 4: nuevos elementos presentes en el terreno, cuenca, viviendas, red de drenaje, que se combinan.

## IMPACTOS DEBIDO A LA VARIABILIDAD DEL CLIMA

En la zona centro del país, (San Luis como parte ella) los cambios o factores climáticos previstos para los tiempos venideros generaran aumento de las precipitaciones, sequias prolongadas e inundaciones frecuentes. Esta variabilidad, ya sea interanual, entre décadas o a largo plazo será evidente y por lo tanto hay que minimizar los impactos y disminuir los riesgos. La ocurrencia de fenómenos de corta duración temporal, pero de gran cantidad de agua disponible (Ej- episodios en las localidades de Villa de la Quebrada año 2002, Quines año 2015, entre otros de menor envergadura) serán cada vez más frecuentes.

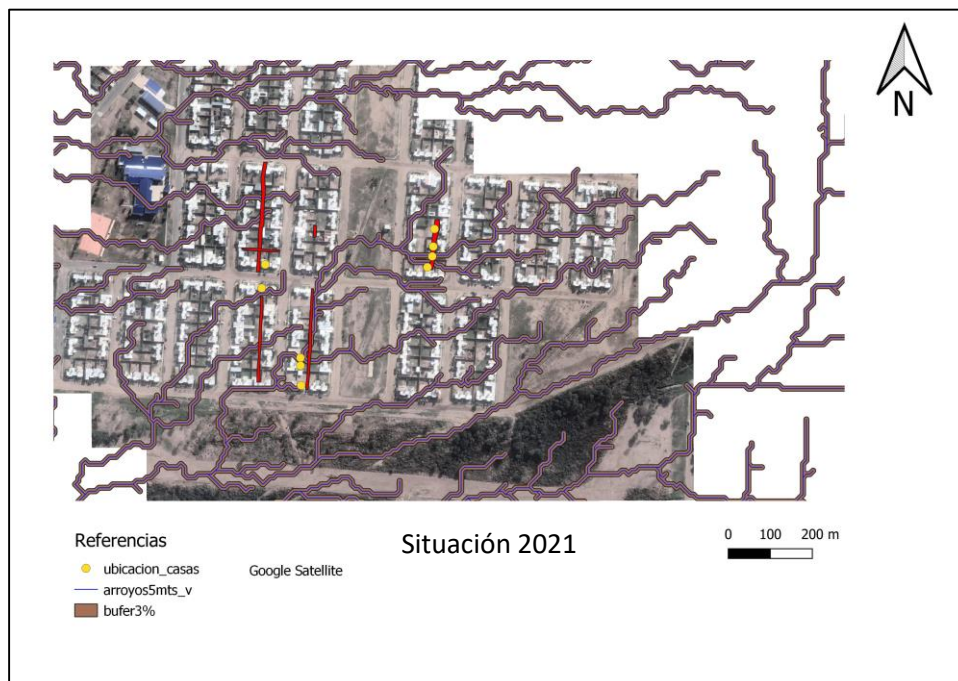
El análisis de la información existente (estaciones pluviométricas) y los escenarios climáticos previstos para la provincia de San Luis, (Vicente R. Barros, 2010), prevén un aumento leve de la precipitación porcentual media para el periodo 2011-2030 de un 5% en la temporada estival en la parte central de la provincia, donde la media anual para el mismo periodo no cambiaría significativamente.

En cambio, para los periodos 2046-2065 los cambios se intensificarían en la parte central de la provincia con valores que excederían el 15% anual.

En la zona de análisis se realizaron Buffers sobre los cursos fluviales tomando como base

- 1- estado actual generación de una cárcava de 1 a 1,5 mts de ancho en año de intensas precipitaciones 3 % más de la media.
- 2- Sobre la base de situación un incremento de 5 % de lluvias
- 3- Sobre la base de situación dos un incremento de 15 % de lluvias

Se puede observar (Fig. 5a), situación 2021, que en las zonas actualmente más afectadas se profundizara el problema, con la inclusión de otras que no están siendo afectadas a la fecha.



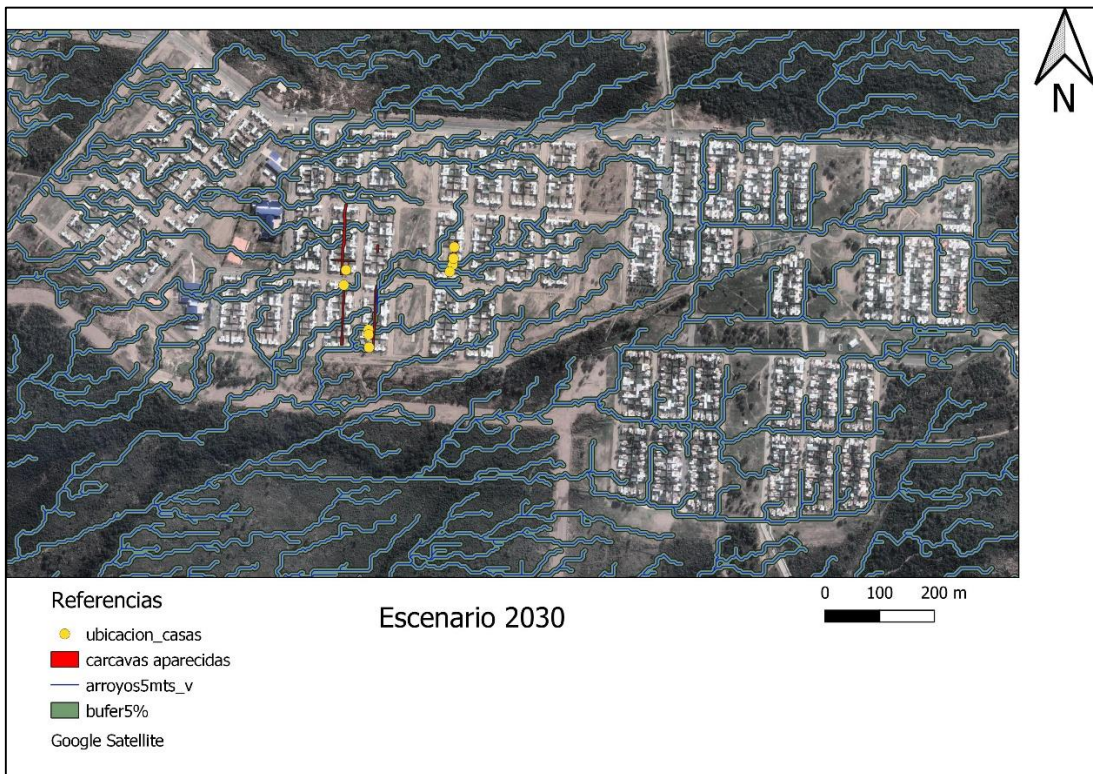


Figura 5B Escenario 2030 buffer de 5%

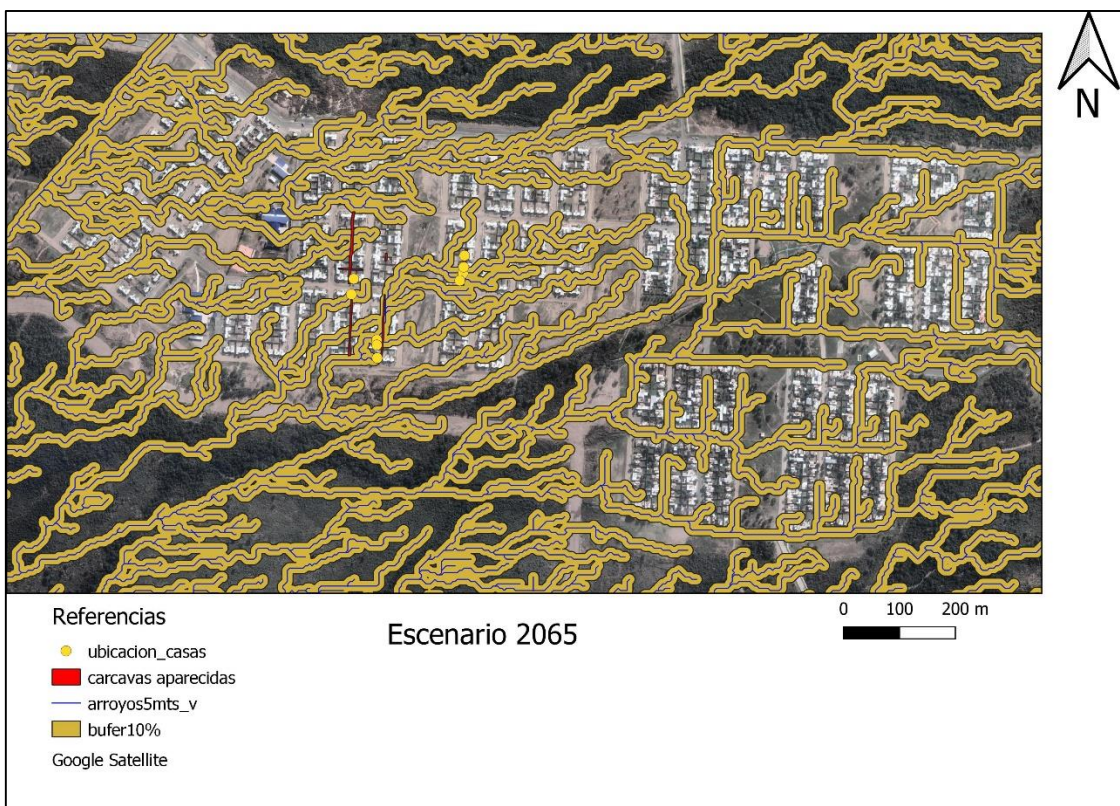


Figura 5C : Escenarios 2065 con un buffer de 10 %



## CONCLUSIONES

- ✓ Las técnicas de análisis de la Teledetección y SIG, la sistematización de los datos nos ayuda a entender la problemática existente en torno al RIESGO de colapso a las que están sometidas las viviendas y obras anexas en ellas construidas
- ✓ Los estudios realizados han permitido sintetizar los siguientes elementos:
- ✓ El área de análisis se encuentra en una microcuenca que se ha generado a partir del cambio de pendiente de la zona.

A Este factor (antrópico) se le suma

- ✓ El área en estudio es susceptible a la ocurrencia de eventos naturales súbitos episódicos de carácter aluvional. Se advierte, sin embargo, una aceleración progresiva de la torrenciabilidad de los fenómenos aluviales y de la capacidad de remoción y transporte de materiales y consecuentemente de la actividad erosiva, la que se encuentra restringida en la actualidad a lo largo de los actuales cursos de escurrimiento superficial.
- ✓ Concentración del flujo de los nuevos cursos de agua generados por la urbanización en la parte superior de la cuenca que en épocas estivales.
- ✓ Impermeabilización (pavimentación) de las calles aguas arriba en la cuenca que facilita es escurrimiento superficial hacia estas áreas más deprimidas.
- ✓ Falta de protección de los cauces naturales de la cuenca.
- ✓ Avance de la urbanización de la cuenca sin ningún criterio de conservación o de protección de los cursos de agua en la parte superior.
- ✓ La combinación de todos estos factores más el aumento de la precipitación ya manifiesta en la zona resulta favorable para la profundización del problema teniendo en cuenta que se prevé un aumento desde un 5 % hasta un 15% en las precipitación media para las próximas décadas, como consecuencia del cambio climático global y de no actuar en forma inmediata se está poniendo en riesgo incluso la vida de los habitantes de la zona.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Restricciones absolutas de realizar construcciones en zonas de cursos de agua.
- ✓ Se recomienda dejar franjas de entre 100 y 150 mts de ancho a ambos lados de las márgenes de los cursos de agua.
- ✓ La urbanización de las nuevas áreas residenciales en las zonas altas, no se deben realizar de acuerdo con el sistema clásico de construcción en ciudades en "Damero" (casa con medianera en diseño de rectángulo). deben hacerse siguiendo el criterio de calles que tengan un mayor desarrollo en el sentido de curvas de nivel.
- ✓ Se debe permitir la existencia de espacios abiertos, de modo que las nuevas urbanizaciones no se transformen totalmente en un área impermeable que aporte aguas abajo el total de sus escurrimientos.
- ✓ Realizar una obra de ingeniería para cortar el flujo superficial y el subsuperficial de este sector de la cuenca.
- ✓ Considerar la posibilidad de reubicación de las viviendas afectadas

actualmente y las que potencialmente pueden llegar a ser afectadas de acuerdo con las áreas buffer establecidas en el análisis en función a la peligrosidad a la que están expuestos.

## REFERENCIAS

- Aranda Ivanna J., Ojeda Guillermo E. “Análisis morfométrico de las cuencas hídricas de la ladera occidental de las sierras de San Luis, Argentina. XIX Congreso Geológico Argentino, Cordoba 2014.
- Bárcena A. y otros. “La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?”. Libros de la CEPAL, N° 160 (LC/PUB.2019/23-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020.
- Barros Vicente R., Mario N. Núñez, Inés Camilloni, Silvina Solman. “Escenarios climáticos para la provincia de San Luis”. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET – UBA), UNLPunta 2010.
- Lampis. Andrea “Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición”. REVISTA COLOMBIANA DE GEOGRAFÍA | Vol. 22, n.º 2, jul.-dic. del 2013.
- Morosini Augusto, Christiansen, R., Enriquez, E., Pagano, D.S., Peron Orrillo, J., Ortiz Suarez, A., Martinez, M.P., Munoz, B., Ramos, G., 2021. “Architecture and kinematics of the Famatinian deformation in the Sierra Grande de San Luis: a record of a Collisional history at 33° S latitude. J. S. Am.EarthSci.105,102986.”
- Piers Blaikie, Terry Cannon, David Ben W. “Vulnerabilidad entorno social, político y económico de los desastres”. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina Primera Edición: Julio de 1996.
- Steenken, A., López de Luchi, M.G., Martínez Dopico, C., Drobe, M., Wemmer, K., Siegesmund, S., 2010. The neoproterozoic-early paleozoic metamorphic and magmatic evolution of the eastern sierras Pampeanas: an overview. Int. J. Earth Sci.1–24. <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0624-0>.
- Sims, J., Ireland, T., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P., Skirrow, R., Stuart-Smith, P., Miro, R., 1998. U-Pb, Th-Pb and Ar-Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Paleozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin. In: Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. (Eds.), The Proto- Andean Margin of Gondwana, vol. 142. Geological Society, London, Special Publication, pp. 256–281.
- Urbina Nilda. E. y Sruoga. Patricia 2009. La Faja Metalogénica de San Luis (FMSL), Sierras Pampeanas, Argentina: mineralización y geocronología en el contexto metalogénico regional. Revista de la Asociación Geológica Argentina 64: 635-645.
- 2da Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, 2007.

3era Comunicación nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático, 2015.

1er Informe bienal de actualización de la CMNUCC, 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina.

2do Informe bienal de actualización de la CMNUCC, 2017. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina.

3er Informe bienal de actualización de la CMNUCC, 2019. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina.

Informe bienal de actualización de la CMNUCC, 2021. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Argentina.

# MONITOREO DE ÁREAS AFECTADAS POR UN INCENDIO MEDIANTE TELEDETECCIÓN, EN EL SUDOESTE BONAERENSE.

Adriana Guzmán<sup>a</sup> y Fernanda Gaspari<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires -CEIDE-FCAyF-UNLP, ARGENTINA.

<sup>b</sup>CEIDE- FCAyF-UNLP, ARGENTINA.

e-mail: [adriana.guzman@agro.unlp.edu.ar](mailto:adriana.guzman@agro.unlp.edu.ar)

## RESUMEN

*El monitoreo rápido y preciso de zonas afectadas por incendios es importante para el manejo del fuego, cualificar y cuantificar pérdidas ambientales, definir estrategias de planificación y monitorear la restauración de la vegetación. Con el fin de reportar información inmediata acerca del desarrollo de incendios, el uso de sensores de resolución espacial y espectral mejorados brinda nuevas oportunidades para evaluar la gravedad de las quemaduras. En este estudio se monitoreó el incendio acaecido entre el 14 y 18 de febrero de 2018, afectó a la comarca Abra la Ventana, Estancia Funke y Villa Ventana en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Debido al fácil acceso y alta resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales provenientes del satélite SENTINEL, a partir de ellas se calculó el índice normalizado de área quemada (NBR), aplicado en muchos estudios y recomendado por la ONU para evaluar la severidad del incendio. Para el monitoreo de la restauración de la vegetación se seleccionaron 12 píxeles puros dentro de la zona quemada, la detección de fechas claves pre y post fuego se recurrió a plataformas de libre acceso como SatVeg y Google Earth Engine que otorgan acceso al producto MODIS/006/MOD13Q1, que se refiere a valores de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días. El área del incendio fue de 18 mil ha, de esto el 4,7% se corresponde a severidad alta, 71,84% moderada y 19,4% baja. En referencia a la restauración de la vegetación quemada los píxeles caracterizados muestran una caída promedio del NDVI de 0,42 en el inicio del verano a 0,26 después del incendio. Es importante mencionar que el fuego fue parcialmente apagado por una lluvia de 63mm.*

Palabras Clave: Incendio, Monitoreo, Teledetección.

## INTRODUCCIÓN

En el sudoeste de la provincia de Buenos Aires se localiza en sistema serrano de Ventana que posee una configuración geológica con alto valor turístico, hidrológico por ser la zona de recarga de varios arroyos y es uno de los pocos lugares en la provincia que preserva su vegetación natural y faunística que presenta varios endemismos, por ello en este lugar se localiza el Parque Provincial Ernesto Tornquist (PPET)(Caicedo Toro et al., 2021).

Se trata de una zona semiárida con alta variabilidad climática, que registra valores extremos debido a la alternancia permanente de masas de aire, debido al cordón serrano, que afectan a la precipitación y temperatura. Estas condiciones integradas en su

topografía y tipo de vegetación (pasturas, bosques de pino que producen abundante materia seca) la convierten en una zona susceptible a incendios, ya sean por causas naturales, debido a la gran cantidad de rayos que se presentan, o provocado como resultado de las actividades productivas que ahí se desarrollan (Uboldi et al., 2011) y de tipo recreativo-turístico, por descuido en el apagado de fogones.

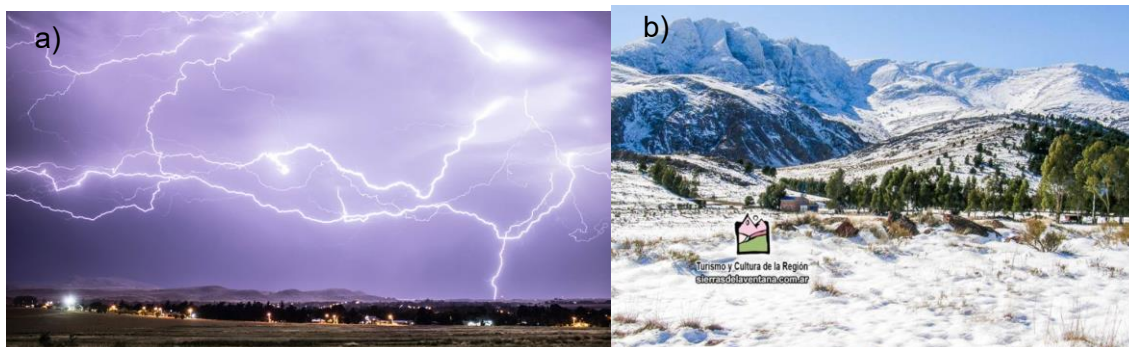


Figura 1. Extremos climáticos en el sistema serrano de Ventana; a) Tormenta eléctrica del día 23/11/2020; b) Nevada del 20/08/2016.

Fuente: Sierras de la Ventana (2016); Telefe Bahía Blanca (2020)

Debido a que en este tipo de ecosistemas se considera al fuego como un elemento modelador del paisaje, ya que contribuye al balance de pastos y arbustos (Delegido et al., 2017). El monitoreo rápido y preciso de zonas afectadas por incendios es importante para el manejo del fuego, cualificar y cuantificar pérdidas ambientales y sus efectos sobre agro-ecosistemas, definir estrategias de planificación y monitorear la restauración de la vegetación.

Con el fin de reportar información inmediata acerca del desarrollo de incendios, el uso de información satelital proveniente de sensores remotos con resolución espacial, temporal y espectral mejorados brindan nuevas oportunidades para evaluar la gravedad de las quemaduras (Fischer et al., 2012).

El objetivo del presente estudio fue realizar el monitoreo del incendio acaecido entre el 14 y 18 de febrero de 2018, que afectó a la comarca Abra la Ventana, Estancia Funke y Villa Ventana en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

## MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Área de estudio

De acuerdo a medios de comunicación locales y nacionales (Clarín, 2018; La Voz del Pueblo, 2018; Semanario Observador Serrano, 2018), en el sistema serrano de Ventana el último incendio de grandes proporciones fue el registrado entre el 14 y 18 de febrero del año 2018. Las llamas, que se iniciaron debajo de un puente sobre la ruta provincial 76, avanzaron en diversas direcciones, alentadas por el fuerte viento con intensidades no menores a los 30 kilómetros por hora y ráfagas que superaban los 60. Entre los principales afectados fueron la comarca Abra La Ventana, Estancia Funke y Villa Ventana, en el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

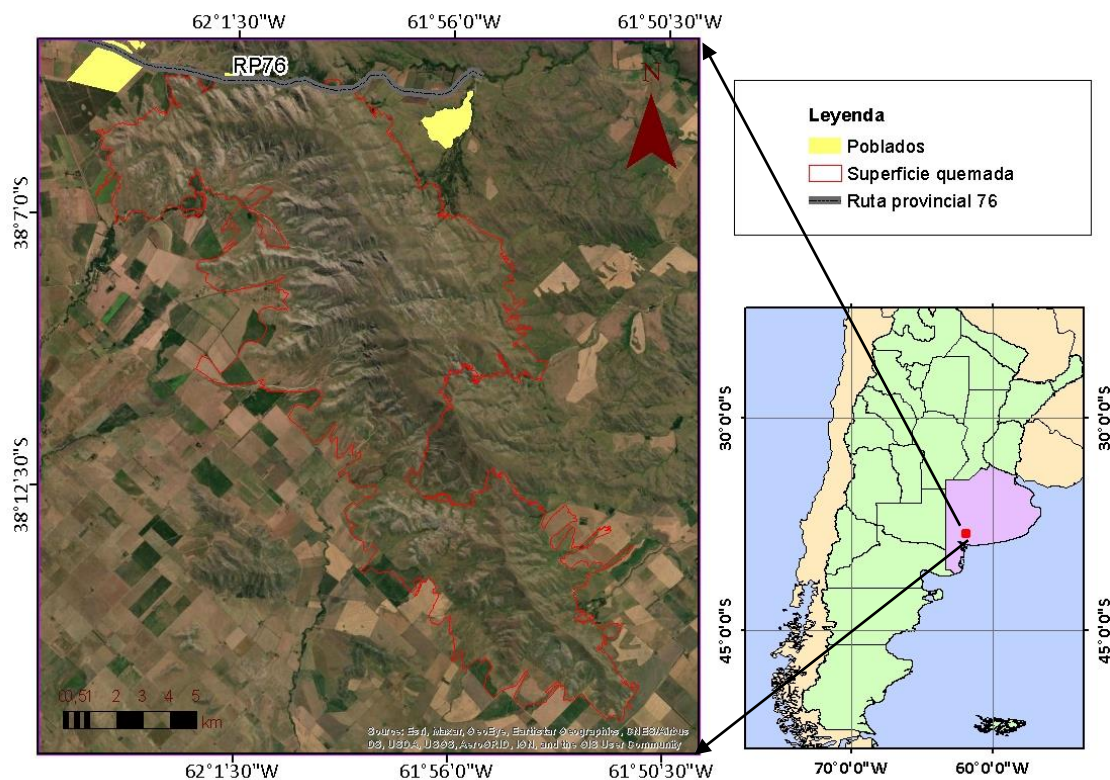


Figura 2. Localización del área de estudio.

De acuerdo con la clasificación de Thornthwaite (1948), el clima de la región es subhúmedo seco, con una precipitación media anual de 610 mm, con gran variabilidad de los valores medios, con gran variabilidad espacial y temporal. El periodo más caluroso comprende de enero a febrero con temperaturas que supera los 30°C e inferiores a 15°C; los meses más fríos se extienden de junio hasta agosto, llegando a registrarse heladas y nevadas (Michalijos, 2018).

### Imágenes y procesamiento

A través de la plataforma de acceso libre SATveg (<https://www.satveg.cnptia.embrapa.br/>) que es un Sistema de Análisis Temporal de la Vegetación desarrollado como una herramienta Web desarrollada de Embrapa Agricultura Digital, destinada a facilitar el acceso y visualización de perfiles temporales de los índices vegetativos NDVI y EVI, se realizó un análisis temporal rápido, que permitió establecer fechas importantes para describir la evolución del incendio. Estas fechas fueron inicio y fin del incendio, corroboradas con datos de entrevistas informales y de portales periodísticos de internet, y también se visualizó la posible recuperación de la vegetación, dato necesario para establecer la severidad del fuego.

Con las fechas obtenidas del análisis anterior, en la plataforma de análisis científico y visualización de datos geoespaciales GoogleEarthEngine (GEE) se confirmó la zona incendiada con imágenes SENTINEL-2 de resolución espacial de 10m en valores de reflectancia, pertenecientes a la colección "COPERNICUS/S2".

## Estimación de la severidad del fuego

La estimación de la severidad del fuego se realizó a partir del índice NBR de la metodología recomendada por la ONU con base en lo expuesto por Keeley (2009), en la zona anteriormente definida.

El índice NBR (Ecuación 1) permite obtener un valor de áreas quemadas mucho más preciso respecto a otros índices (Guillem-Cogollos et al., 2017), combinando longitudes de onda de infrarrojo cercano (NIR) cuya reflectividad disminuye por la pérdida de la vegetación e infrarrojo de onda corta (SWIR) en la que aumenta la reflectividad por la pérdida de la humedad, mayor exposición del suelo y menores sombras proyectadas por la vegetación, cuando el valor del índice es alto indica vegetación saludable, un valor bajo se relaciona con suelo desnudo y áreas recientemente quemadas (Figura 3) (Keeley, 2009; Delegido et al., 2017) .

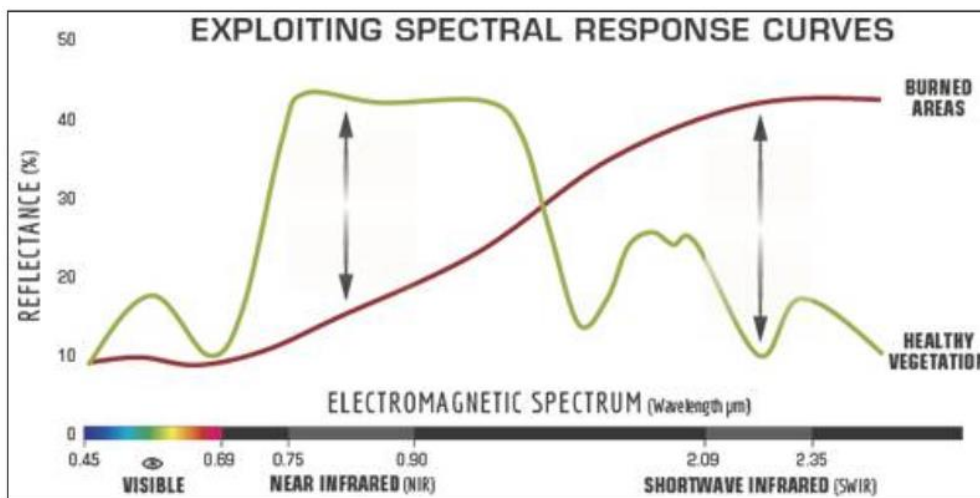


Figura 3. Respuesta espectral de áreas quemadas.

Fuente: United Nations( 2011)

Ecuación 1

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$








La severidad del fuego  $\Delta\text{NBR}$  (Ecuación 2) está dada por la diferencia entre el NBR pre-fuego (preNBR) y post-fuego (posNBR).

Ecuación 2

$$\Delta\text{NBR} = \text{preNBR} - \text{posNBR}$$

Para una mejor interpretación de los valores de severidad el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) propuso la siguiente clasificación (Tabla 1):

Tabla 1: Niveles de severidad en los incendios a partir del  $\Delta\text{NBR}$ .

	<b>Nivel de severidad</b>	<b><math>\Delta\text{NBR}</math></b>
	Rebrote mejorado, alto (post-fuego)	-0,5 – (-0,251)
	Rebrote mejorado, bajo (post-fuego)	-0,251 – (-0,101)
	Sin quemar	-0,1 – 0,99
	Baja severidad	0,1 – 0,269
	Moderadamente – baja severidad	0,270 – 0,439
	Moderadamente – alta severidad	0,440 – 0,659
	Alta severidad	0,66 – 1,3

Fuente: Guillem-Cogollos et al. (2017)

### **Monitoreo de la vegetación afectada**

Para el monitoreo de la vegetación afectada por el incendio, se procedió a procesar los NDVI en la plataforma SATveg en el período de estudio desde 01/01/2017 al 31/12/2018, en detalle, para lo cual se tomó como referencia parcelas de 12 píxeles MODIS puros dentro del área quemada.

A través de la plataforma GEE se obtuvieron los valores promedio mensual de NDVI en formato csv, a partir de la colección “MODIS/006/MOD13Q1”, con una resolución espacial de 250 m y temporal de 16 días.

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La Figura 4 muestra el desarrollo temporal del incendio según:

- ⇒ imagen satelital de pre-fuego en la fecha 07/01/2018,
- ⇒ como fuego la del 16/02/2018, que muestra el avance del fuego sobre los lados este y oeste de la cadena serrana de Ventana, hasta las últimas estribaciones del cordón Santo Tomas de las Sierras,
- ⇒ finalmente, la imagen post-fuego del 26/02/2018 permite distinguir el área que se ha visto comprometida por el incendio, considerando también que fue contenido por la lluvia registrada los días 17 y 18 de febrero de 2018 y la labor de los bomberos y personal del PPET.

La figura se definió con base a la indicado por la European Space Agency (2015) la combinación RGB dada por las bandas 11, 8A y 4 de las imágenes satelitales, se logró distinguir fácilmente la configuración del paisaje, el avance del incendio y las áreas afectadas. La B11 – SWIR se relaciona principalmente con el contenido de humedad en la vegetación y en el suelo, la B8A – NIR guarda estrecha relación con la presencia de



vegetación, y en el caso de SENTINEL, tiene mayor sensibilidad para evitar la interferencia por vapor de agua presente en la atmósfera, y la B4 – RED EDGE, que al igual que B8A, caracteriza a la vegetación.

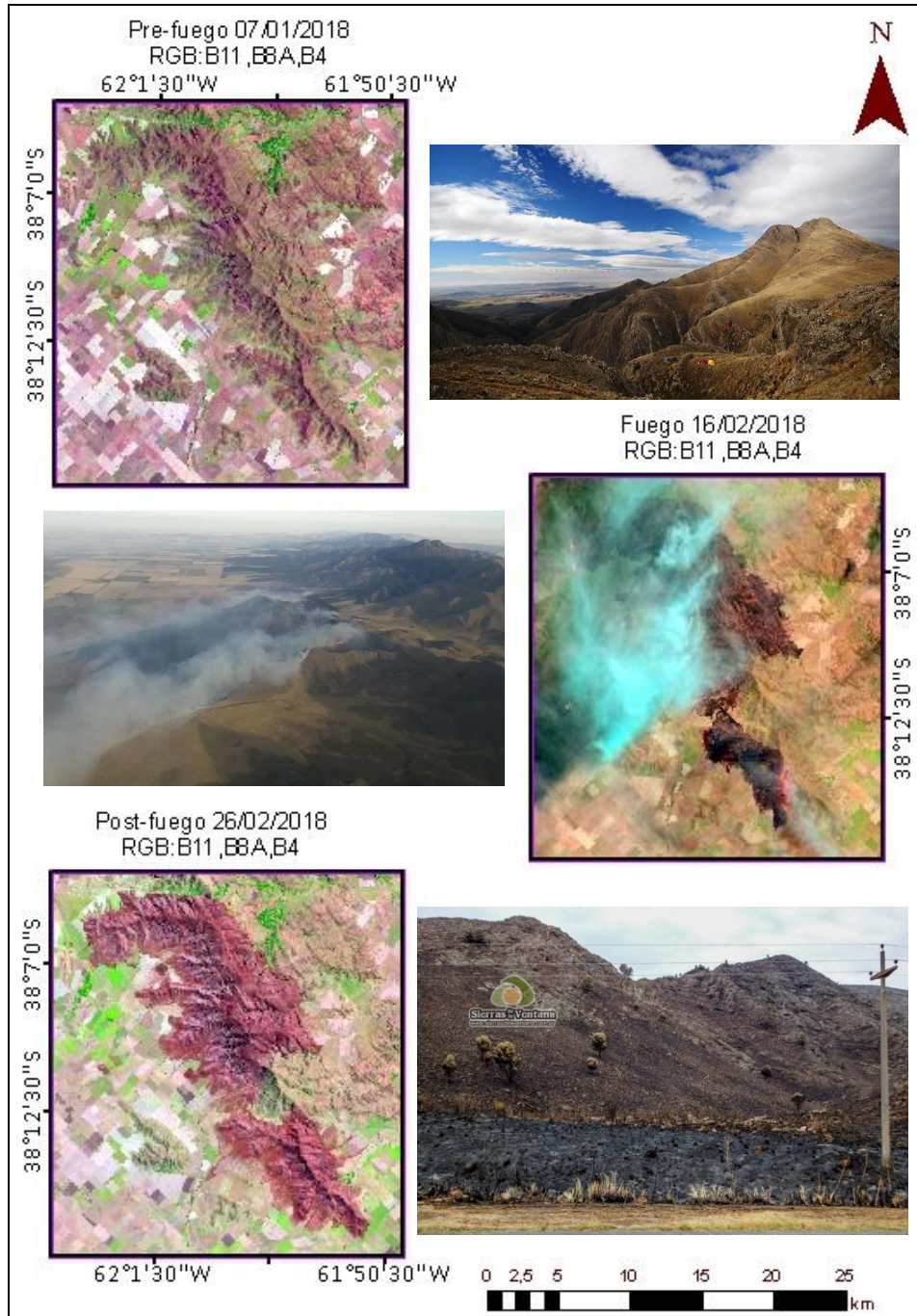


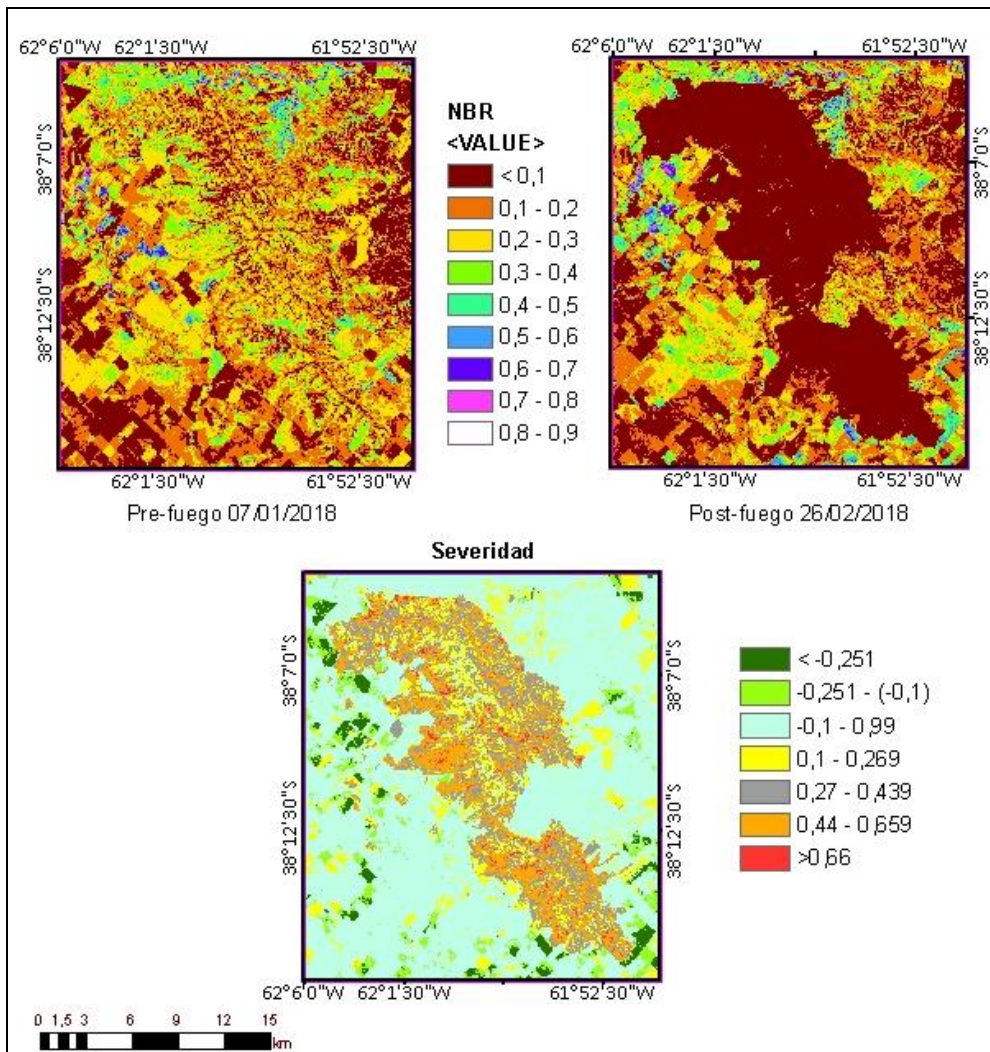
Figura 4. Secuencia temporal de desarrollo del incendio en estudio.

### Severidad del fuego

Considerando lo expuesto por Delegido et al. (2017) para el cálculo del índice NBR se tomaron las bandas 8A y 12 (NIR y SWIR) de 865 y 2190 nm respectivamente. Esta combinación tiene una buena correlación frente a otras clásicas, permitiendo una mejor

diferenciación del área afectada (Figura 5). En la imagen pre-fuego se observan valores bajos del índice NBR, que se deben a la intensa sequía que azotaba a la zona, como lo confirma la declaración de emergencia agropecuaria dada por Decreto provincial 383 E/2018. Estas condiciones favorecieron a la producción de biomasa seca que sirvió de material combustible durante el incendio favorecido por los fuertes vientos y pendientes. En la imagen post-fuego se observa el área quemada como una gran mancha con valores de NBR menor a 0,1.

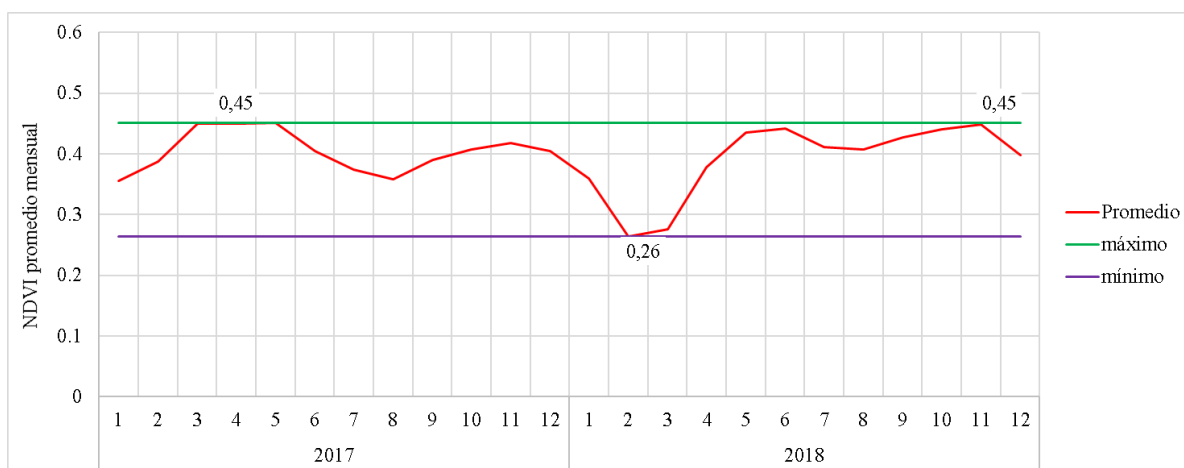
Del análisis de las imágenes de NBR y severidad, el área quemada posee un área de 17845 ha, de la cual el 37,9% se corresponde a la categoría moderadamente – baja severidad; el 33,94% es moderadamente – alta severidad; 19,45% es de baja severidad y el 4,7% de alta severidad. Espacialmente se infiere que los valores moderados y altos de severidad se localizan en lugares que presentan mayor vegetación principalmente pastizal natural y los valores bajos están en la parte alta de las sierras que presentan abundante roca descubierta con escasa cobertura vegetal.



**Figura 5.** Nivel de severidad del incendio .

### Monitoreo de la vegetación afectada

Los valores mensuales de NDVI de los 12 pixeles tomados como muestra presentaron una dinámica similar y al promediarlos para caracterizar la zona quemada, se observa la resiliencia que presenta la cobertura vegetal de las sierras, como se puede ver en la Figura 6 en el mes de febrero de 2018 se observa como el NDVI alcanza su valor mínimo de 0,26 registrado durante el periodo de estudio, producto de la pérdida de vegetación por el incendio. La recuperación de la actividad fotosintética de la zona quemada es muy rápida, ya que, al mes, se observa un incremento de los valores de NDVI, incluso superó a los registrados previamente al fuego, tardó 8 meses en alcanzar el valor máximo de 0,45 pre fuego.



**Figura 6.** Evolución de la vegetación y la afectación del incendio en febrero de 2018.

### CONCLUSIONES

Las características de la cubierta vegetal, principalmente pastizal, resulta escasa en la parte alta de la sierra, y de mayor concentración en laderas y pie de monte, ello determinó la distribución espacial de los niveles de severidad del fuego, tal como lo expresa Uboldi et al. (2011), quien señala que en esta zona la vegetación mayoritariamente afectada resulta ser el pastizal por su alta combustibilidad.

Al monitorear la recuperación del área quemada se observó una rápida recuperación de los valores de NDVI que guarda estrecha relación con la actividad fotosintética, sin embargo, queda pendiente determinar qué tipo de vegetación está rebrotando, ya que como lo menciona Michalijos (2018), los incendios pueden contribuir a la introducción de especies de rápida propagación.

La teledetección es una herramienta muy robusta de muchas aplicaciones y en este caso en el seguimiento de incendios, y recuperación de la vegetación comprometida. En el caso de las imágenes SENTINEL, su alta resolución espacial, radiométrica y temporal permitió captar todo el desarrollo y severidad del incendio. En el caso de MODIS a través de su producto de NDVI, proporcionó información para realizar el monitoreo de la recuperación de la vegetación. Sin embargo, para mejores resultados y corroborar la información obtenida es necesario una evaluación de campo.

## REFERENCIAS

- Caicedo Toro, M. D., Cabrera Estupiñán, E., Zambrano Navarrete, X. A., Rodríguez Bravo, M. E., Intriago Zambrano, P. E., Caicedo Toro, M. D., ... Intriago Zambrano, P. E. (2021). Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 8(SPE2). <https://doi.org/10.46377/DILEMAS.V8I.2605>
- Clarín. (2018, February 16). *El calor y el viento complica las tareas. Incendios fuera de control en Sierra de la Ventana*. Retrieved from [https://www.clarin.com/sociedad/incendios-control-sierra-ventana\\_0\\_BJTfFKEvf.html](https://www.clarin.com/sociedad/incendios-control-sierra-ventana_0_BJTfFKEvf.html)
- Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jiménez, J. C., ... Moreno, J. (2017). Potencialidad de índices de severidad de incendios utilizando Sentinel2 y su análisis comparativo con Landsat8 en el Sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina) en 2017. *XVII Congreso de La Asociación Española de Teledetección*, (1), 3–6. Retrieved from [https://inta.gov.ar/sites/default/files/articulo\\_aet17\\_incendiosargentina-inta.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/articulo_aet17_incendiosargentina-inta.pdf)
- European Space Agency. (2015). *SENTINEL-2 User Handbook* (B. Hoersch, Ed.). Retrieved from [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook)
- Fischer, M. A., Di Bella, C. M., & Jobbágy, E. G. (2012). Fire patterns in central semiarid Argentina. *Journal of Arid Environments*, 78, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.009>
- Guillem-Cogollos, R., Vinué-Visús, D., Caselles-Miralles, V., & Espinós-Morató, H. (2017). Estudio crítico de los índices de severidad y la superficie afectada por el incendio de Sierra de Luna (Zaragoza). *Revista de Teledeteccion*, 2017(49 Special Issue), 63–77. <https://doi.org/10.4995/RAET.2017.7117>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- La Voz del Pueblo. (2018, February 2). *Incendio en las sierras: el fuego cruzó la ruta 76 y va hacia el Parque Tornquist - La Voz del Pueblo*. Retrieved from <https://lavozdelpueblo.com.ar/noticia/70288-Incendio-en-las-sierras-el-fuego-cruzo-la-ruta-76-y-va-hacia-el-Parque-Tornquist>
- Michalijos, M. P. (2018). *Estudio del riesgo de incendio forestal en un sector de la comarca de la Sierra de la Ventana utilizando geotecnologías*. (Universidad Nacional del Sur). Retrieved from [https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4472/michalijos\\_digital.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/4472/michalijos_digital.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Semanario Observador Serrano. (2018, February 24). *Más de 40.000 hectáreas arrasadas por el fuego*. pp. 4–7. Retrieved from [https://issuu.com/semanarioobservadorserrano/docs/observador\\_1579?fbclid=IwAR19ZtgeItw-d23WAvCfBczHGx7WYV1\\_dJ78\\_4-FYbcu\\_s4rb3eKerX7cBU](https://issuu.com/semanarioobservadorserrano/docs/observador_1579?fbclid=IwAR19ZtgeItw-d23WAvCfBczHGx7WYV1_dJ78_4-FYbcu_s4rb3eKerX7cBU)
- Sierras de la Ventana. (2016). *Nevadas en las Sierras - Fotos y Videos - Sierra de la Ventana*. Retrieved November 5, 2021, from <https://www.sierrasdelaventana.com.ar/naturales/nevadas-en-las-sierras/>
- Telefe Bahía Blanca. (2020, November 23). *Fotos: tormenta eléctrica en Sierra de la Ventana - Telefe Bahía Blanca*. Retrieved November 5, 2021, from <https://bahia.telefe.com/locales/fotos-tormenta-electrica-en-sierra-de-la-ventana/>
- Uboldi, J., Laucirica, J., Michalijos, P., & Mancino, M. (2011). Cambio climático, turismo y riesgo de incendios forestales, de pasturas y de interfase, en el sudoeste bonaerense, su análisis con geotecnologías. *Revista Geográfica de América Central Número Especial EGAL*, 1–15. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/4517/451744820661.pdf>
- United Nations. (2011). UN-SPIDER Knowledge Portal UN-SPIDER Knowledge Portal. *Portal*, (Figura 2), 22–23. Retrieved from <https://un-spider.org/es/node/10959>

# **DIGITALIZACION DE PROCESOS, VINCULACION Y EVALUACION EN PRACTICAS PROFESIONALES ASISTIDAS EN LA FACULTAD DE INGENIERIA- UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY-ARGENTINA**

Eduardo Patricio Herrera Oviedo<sup>ac</sup>, Julio Tentor<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Catedra de Geología regional y practicas profesionales, Facultad de ingeniería FI, Universidad de Jujuy, ARGENTINA*

<sup>b</sup>*Secretaria de extension y planificacion , Facultad de ingeniería FI, Universidad Nacional de Jujuy, ARGENTINA*

<sup>c</sup>*INECOA, Instituto de Ecoregiones andinas, CONICET, ARGENTINA*

*e-mail: [patricioherrera@fi.unju.edu.ar](mailto:patricioherrera@fi.unju.edu.ar)*

## **RESUMEN**

En este trabajo se presenta los avances y alcances de vinculación tecnología en la facultad de ingeniería de Jujuy, a partir de la digitalización de procesos y evaluación, desde el inicio a la finalización de la Práctica Profesional Asistida (PPA), desde el área de Geociencias que incluyen las carreras de Licenciatura en Ciencias Geológicas, y las Tecnicaturas en Ciencias de la Tierra, en Perforaciones y en Petróleo. A partir del año 2018, con la explícita idea de mejoramiento en optimizar el tiempo y facilitar la gestión en trámites administrativos y académicos, se propuso: 1- Utilizar el sistema SIU Guaraní para obtener el aval en la inscripción de los alumnos. 2-Crear formularios online de inscripción directa a través de la Secretaria de Extensión de dicha facultad 3- Vincular Digitalmente y siguiendo un esquema en base a la resolución FI N° 248-08 la cual define las condiciones para realizar la práctica tanto en Empresas privadas, Instituciones y en las Universidades Nacionales (Ep-In-Un). 4-Creacion de Aulas Virtuales Asociadas Directamente desde la Secretaria de Extensión, en la cual los estudiantes cargan de manera virtual todos los documentos en formato PDF y Word (de esta manera queda abierto a devoluciones y modificaciones en cada caso, debido a que el tiempo de ingreso generalmente no coincide con el trámite administrativo entre las (Ep-In-Un) vinculando directamente la resolución FI N° 207 2020. Por último durante la etapa de aislamiento, acelero el proceso y la digitalización, dando como resultado la rápida inscripción y registro automático de las PPA en convocatorias esto repercute directamente en el índice de estudiantes que egresan, facilitando la gestión.

*Palabras Clave:* (Digitalización-Procesos-Evaluación- Vinculación)

## ABSTRACT

This work presents the advances and scope of technology linkage in the Jujuy engineering faculty, from the digitization of processes and evaluation, from the beginning to the end of the Assisted Professional Practice (PPA), from the area of Geosciences that include careers Degree in Geological Sciences, and Techniques in Earth Sciences, Drilling and Petroleum. As of 2018, with the explicit idea of improvement in optimizing time and facilitating the management of administrative and academic procedures, it was proposed: 1- Use the SIU Guaraní system to obtain the endorsement in the enrollment of students. 2-Create online forms for direct registration through the Extension Secretariat of said faculty 3- Link Digitally and following a scheme based on resolution FI N ° 248-08 which defines the conditions to carry out the practice both in private companies, Institutions and National Universities (Ep-In-Un). 4- Creation of Associated Virtual Classrooms Directly from the Extension Secretary, in which students virtually upload all documents in PDF and Word format (in this way it remains open to returns and modifications in each case, due to the time entry generally does not coincide with the administrative procedure between the (Ep-In-Un) directly linking resolution FI N ° 207 2020. Finally, during the isolation stage, I accelerate the process and digitization, resulting in the rapid registration and automatic registration of PPAs in calls and has a direct impact on the rate of students who graduate, facilitating management.

*Keywords:* (Digitization-Processes-Evaluation- Linkage)

## INTRODUCCIÓN

Durante los años 2018 y 2019, se propuso desde la facultad como institución acelerar el proceso de cursado de prácticas profesionales, desde el inicio a la finalización de la Práctica Profesional (PPA), desde el área de Geociencias que incluyen las carreras de Licenciatura en Ciencias Geológicas, y las Tecnicaturas en Ciencias de la Tierra, en Perforaciones y en Petróleo, para esto se formuló verificar en qué medida administrativa, se encontraban obstáculos y cuánto tiempo era el total en días, meses y algunos casos años, que se utilizaba entre el inicio y el final para la PPA.

Las características de cada caso en estudiantes de estas carreras mostraron, que se debía buscar alguna norma o guía que vincule resoluciones, inscripciones, promedio académico, contratación de seguros, carga de currículos, notas firmadas y/o escaneadas, informe final evaluaciones y nota (entre otras que irían sumándose al ser una resolución CAFE 248/08 la que se debía vincular).

El Expediente electrónico agiliza los trámites del procedimiento administrativo por la incorporación permanente de tecnología de información (TIC), describe el principio de digitalización para procesos que están relacionados al nuevo régimen de digitalización

en el procedimiento administrativo: desburocratización y simplificación normativa (Ley 27.446) (Salgan Ruiz 2018), MJ-DOC-13766-AR | MJD13766. Esta consideración podría estar sujeta a modificaciones y aplicarse dentro de las facultades y a las universidades. Durante el año 2019 el SISTEMA NACIONAL DE DOCUMENTACIÓN HISTÓRICA (SNDH), publica la GUÍA GENERAL DE DIGITALIZACIÓN DE DOCUMENTOS para el desarrollo de proyectos por parte de las instituciones adherentes al SNDH, así como también un instrumento didáctico y sistémico, las directrices con las cuales poder transitar la organización dinámica y efectiva de distintos tipos de instituciones que custodian archivos.

### 1.1 *Procesamiento digital*

*“La determinación final respecto de la selección de la documentación a digitalizar debe ser una decisión de la autoridad máxima de cada institución, de acuerdo con su misión institucional y las funciones que de ella se derivan. Cuando la institución conste de departamentos o áreas que eleven proyectos para la aprobación de la dirección, esta Guía será la que estandarice dicho proceso”. Versión 1.0 agosto de 2019.*

### 1.2 *Universidad nacional de Jujuy*

Por resolución R N° 0471/2020 estableció “PRINCIPIOS GENERALES PARA EL DICTADO DE CONTENIDOS EN FORMA VIRTUAL, INSTANCIAS DE EVALUACION Y SU ACREDITACION EN EL MARCO DE LA CUARENTENA SANITARIA ESTABLECIDA POR LA AUTORIDAD FEDERAL Y PROVINCIAL”

### 1.3 *Facultad de ingeniería de la universidad de Jujuy*

Por resoluciones FI N° 150/2020, FI N° 179/2020 y FI N° 185/2020 y que tanto la práctica profesional y en trabajo final se desarrollan en empresas privadas (Ep), Instituciones (In) y en la Universidad. En este sentido mediante resolución CSN°239/18 dispone en su 1er artículo “autorizase la utilización de Expedientes Electrónicos, Documentos electrónicos, Firmas Electrónicas y Digitales, Archivos Electrónicos y Digitales en todos los Procesos y Procedimientos en el ámbito de la Universidad Nacional de Jujuy, así como la notificación por medios electrónicos, estableciendo la obligatoriedad de constituir domicilio electrónico en toda tramitación que se origine en el ámbito de la universidad”.

### 1.4 *Cuentas de correo electrónico institucional*

Los postulantes como primera instancia deben crear una cuenta institucional provista a través de la página de la Universidad Nacional de Jujuy <https://virtual.unju.edu.ar/> y registrarse en el aula virtual de la cátedra de Prácticas Profesionales de la Facultad de Ingeniería.

La secretaria de extensión creó a través de un formulario web que se encuentra publicado en la página de la Facultad de Ingeniería <https://www.fi.unju.edu.ar/practicaprofesional.html>, en el cual el alumno realiza un primer registro para la búsqueda de datos académicos y correlatividades que se

encuentran cargados en el sistema SIU Guaraní (Este sistema es el único soporte académico legítimo, para la realización de la Practica y sin este el alumno no está en condición cursar), está publicado de cada carrera los requisitos según la disposición de cada plan de estudio vigente.

A través de la secretaria de Extensión y la catedra de prácticas profesionales [pp.licenciatura.en.ciencias.geologicas@fi.unju.edu.ar](mailto:pp.licenciatura.en.ciencias.geologicas@fi.unju.edu.ar) se vincula un aula entre el postulante, y los correos institucionales, mediante la carga de documentación en formato PDF y en formato Word para el informe final (ya que está sujeto a modificaciones que el postulante puede realizar a pedido del tribunal y/o el Tutor y/o el Titular de la catedra dependiendo de la instancia en la que se encuentre).

## **MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### *1.5 Objetivo General*

Acelerar el proceso para realizar prácticas profesionales implementando la GUÍA GENERAL DE DIGITALIZACIÓN DE DOCUMENTOS del SISTEMA NACIONAL DE DOCUMENTACIÓN HISTÓRICA Versión 1.0 Agosto de 2019, en la facultad de ingeniería de la universidad nacional de Jujuy, vinculando al sistema de gestión académica (Siu Guaraní).

### *1.6 Objetivos Específicos*

Articular elementos digitales y metodológicos que permitan vincular la Práctica profesional asistida en áreas relacionadas a Geociencias en la facultad de ingeniería.

Generar procesos de intervención directa en el trámite de las prácticas profesionales.

Validar el uso del SIU Guaraní, a través de canales digitales directos, en trámites institucionales.

Contextualizar la intervención de la facultad de ingeniería en trámites Digitales a futuro desde una perspectiva transformadora.

Integrar digitalmente a las empresas privadas e instituciones y universidades a la Facultad de ingeniería de Jujuy en convenios de prácticas profesionales.

### *1.7 PRIMERA PARTE. Criterios de selección de la documentación a digitalizar*

El uso de notas impresas, firmadas y escaneadas fue la primera documentación que se autorizó a partir del envío como documento en formato PDF (formato de documento portátil).



### 1.8 Tareas archivísticas: Identificación, clasificación y descripción

Desde la Secretaria de Extensión se crearon las aulas que tendrían la capacidad de guardar de manera digital todos los documentos presentados por los aspirantes antes, durante y al finalizar la práctica profesional en la facultad de ingeniería, previa inscripción en SIU Guaraní y validación como aceptada, dejando sin efecto la apertura del aula si figura en estado pendiente.

Los/as postulantes deben llenar un formulario que habilita y regula la secretaria de extensión y se publica directamente en la página oficial de la facultad de ingeniería de Jujuy. Durante el periodo de inscripción y validación en siu guaraní, con el propósito de evaluar tiempos del trámite.

### 1.9 Análisis y evaluación de la tecnología requerida: Dispositivos de almacenamiento de los objetos digitales

Los objetos digitales obtenidos van a ser conservados en diversos soportes físicos. Que incluye la base de datos que provee la secretaria de extensión que incluyen discos duros internos, discos duros externos. Está contemplado en la primera etapa continuando con el trámite académico interno, la creación de expedientes en formato físico hasta que el soporte digital sea implementado directamente en las PPA.

Tabla 1. Etapas del proceso implementado

Proceso	Etapas [%]
Creación de Aulas virtuales vinculadas al Siu Guaraní	100
Creación de Expedientes digitales	50
Vinculación con empresas privadas	10
Vinculación con Institutos dependientes de la	100

Universidad Nacional de Jujuy	
Vinculación con Otras Universidades	0

Como resultado de la digitalización de documentos se obtendrán dos tipos de copias:

**Máster:** son reproducciones digitales de alta calidad realizadas con fines de preservación, en formatos sin compresión (o, si es factible, con compresión sin pérdida) que afecte a la calidad del objeto digital.

**Derivada:** a partir de cada máster deberá crearse un archivo apto para la consulta en el formato que corresponda según el tipo de documento. Este paso está en revisión, debido a que el documento firmado y escaneado enviado será verificado a partir del documento original físico hasta que se implemente el proceso digital específicamente antes de finalizar el trámite y carga de nota en el siu guaraní.

**TEXTO IMPRESO** (formato hasta A4) sin comprimir 300 dpi/TIFF sin comprimir Escala de grises, a 8 bits Escala de grises, a 8 bits.

**FOTOGRAFIA/OPACOS COLOR** (diferentes formatos) 600 dpi/TIFF comprimir Color, a 24 bits Color, a 24 bits.

**MAPAS, PLANOS Y PERGAMINOS** (formatos hasta A4) 600 dpi/TIFF sin comprimir Color, a 24 bits.

### 1.10 Organización de los archivos digitalizados

Las digitalizaciones deberán estar organizadas en una estructura jerárquica de carpetas, con forma de árbol, que refleje el esquema de organización de los fondos, dentro de ella se instalarán los ficheros con los documentos digitalizados (Fig.1). Esta estructura aparecerá duplicada, una de ellas destinada a las imágenes de conservación y otra para las de consulta. Con el objetivo es que se mantenga el acceso continuo a los datos digitales. Asimismo, se implementara un sistema de back up en servidores distintos.



**Figura 1.** Procedimiento Digital y desarrollo de la Práctica Profesional el cual describe un mapa mental con los flujos digitales que los vinculan con Universidad, Institutos, Organismos y Empresas Privadas.

### 1.11 Estrategias de Preservación de los Objetos Digitales

Se propone mediante la vinculación de las distintas secretarías de la facultad el acceso directo a la información que requiere la resolución CAFE 248/08 y sus modificaciones. Que deberán ser actualizadas con una nueva resolución que regule la implementación digital (Fig. 2).

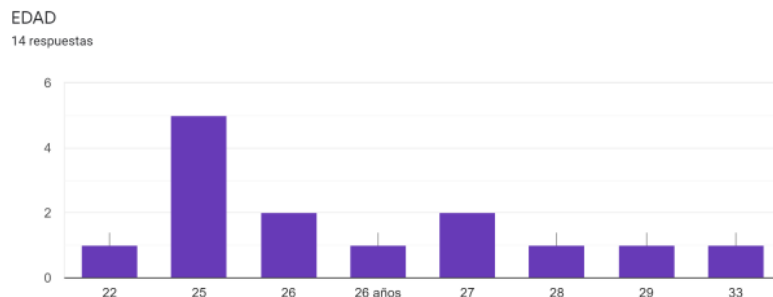
ACEPTA LA PUBLICACION DE LOS DATOS CON FINES ESTADISTICOS Y PARA ARTICULOS CIENTIFICOS. ( NO SE PUBLICARAN DATOS PERS...BRE Y DNI BRINDADOS EN ESTE FORMULARIO WEB  
14 respuestas



**Figura 2.** Formulario de inscriptos que aceptaron la publicación de datos aportado fue del 100%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

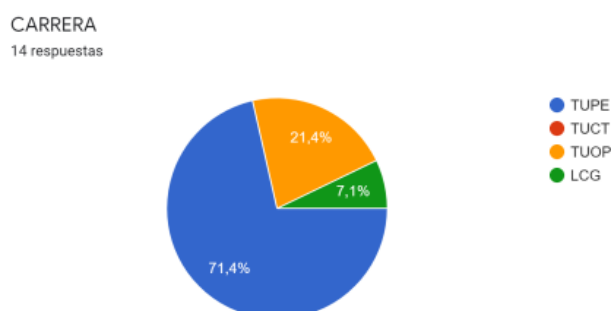
El contexto mundial que trajo medidas de aislamiento social y preventivo provoco la rápida implementación de medios digitales y el retraso en el avance de los estudiantes en las distintas carreras en trámites administrativos (Fig.3, 4).



**Figura 3.** Edades de estudiantes en distintas carreras en condiciones de realizar la practicas, se empezó a recaudar los datos y se renovaran año a año lectivo.



**Figura 4.** Gráfico de respuestas de formularios. TRAMITE DEL CORREO INSTITUCIONAL EN LA PÁGINA DE LA UNJU. Número de respuestas: 14 respuestas este ítem es obligatorio.



**Figura 5.** El proceso digital brinda la posibilidad de acotar el tiempo del trámite personal influyendo directamente en el mayor flujo de egresados, ya que en las carreras de Tecnicaturas que pertenecen al área de Geociencias se reciben con la práctica profesional.

El trabajo en equipo desde lo institucional, dirección de carrera, la secretaria de extensión y el Decanato; con el objetivo de acotar los tiempos administrativos, fue lo que facilitó el flujo del proceso Fig.3, 4 y 5.

## CONCLUSIONES

Este proceso está en implementación y prueba hasta la fecha, sujeto a modificaciones continuamente y permitió agilizar el tiempo que demoraba el trámite en años anteriores.

En futuras convocatorias de prácticas profesionales, se contara con un flujo de proceso mucho más ágil en comparación con el que se contaba.

La duración del trámite, era demasiado extenso, el procesamiento digital le permite a los estudiantes un importante avance en sus conocimientos y una transición adecuada de avance en su carrera, para las actividades fuera del ámbito de la facultad y en el ejercicio de la profesión.

Se plantea la creación de comisiones para la futura implementación del procesamiento digital de las prácticas profesionales de otras carreras de la facultad de Ingeniería y el registro en Sistema Nacional de Repositorios Digitales.

Cada estudiante tiene un contexto personal que influye en el cursado de la práctica profesional y el trámite, vinculado a los tiempos en que las empresas e instituciones necesitan de sus servicios y que pueden incluir un futuro profesional en formación. Esta vinculación digital aplicada muestra que será adecuado la implementación en un futuro inmediato.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por sus aportes al trabajo la predisposición del decanato para continuar con la gestión digital en procesos académicos.

Les damos las gracias a todos los alumnos que aceptaron y contestaron el formulario web con cada modificación que se envió para la publicación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Anijovich, R. & Mora, S. Estrategias de enseñanza: otra mirada al quehacer en el aula. Argentina: Aique, 128p, 2009.
- Guitert, M., Gimenez, F., El trabajo cooperativo en entornos virtuales de aprendizaje, Aprender en la virtualidad, 113-134, 2000. [http://www.setse.org.mx/ReformaEducativa/Rumbo%20a%20la%20Primera%20Evaluaci%C3%B3n/Factores%20de%20Evaluaci%C3%B3n/Pr%C3%A1ctica%20Profesional/Gu%C3%ADasecunciasdidacticas\\_Angel%20D%C3%ADaz.pdf](http://www.setse.org.mx/ReformaEducativa/Rumbo%20a%20la%20Primera%20Evaluaci%C3%B3n/Factores%20de%20Evaluaci%C3%B3n/Pr%C3%A1ctica%20Profesional/Gu%C3%ADasecunciasdidacticas_Angel%20D%C3%ADaz.pdf) . 12.9.2020.
- <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=311583-Ley-27446> HONORABLE CONGRESO DE LA NACION ARGENTINA 30-may-2018, SIMPLIFICACION Y DESBUROCRATIZACION DE LA ADMINISTRACION PUBLICA NACIONAL .DISPOSICIONES Publicada en el Boletín Oficial del [18-jun-2018](http://www.boletinoficial.gob.ar/verDetalle/normas/33893) Número: [33893](http://www.boletinoficial.gob.ar/verDetalle/normas/33893) Página: 3
- <https://aldiaargentina.microjuris.com/2018/06/18/ley-n-27446-simplificacion-y-desburocratizacion-de-la-administracion-publica-nacional-disposiciones/> Principio de digitalización para procesos que están relacionados al nuevo régimen de digitalización en el procedimiento administrativo:

desburocratización y simplificación normativa (Ley 27.446) (Salgan Ruiz 2018), MJ-DOC-13766-AR | MJD13766.

<https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/>

LAS PRÁCTICAS PRE-PROFESIONALES, UN DISPOSITIVO DE APOYO PARA UN SABER PENSAR Y UN SABER HACER CRÍTICO EN LA FORMACIÓN UNIVERSITARIA. CASO FCA UNJU Montenegro Osvaldo David Facultad Ciencias Agrarias UNJU Email: [montear2009@hotmail.com](mailto:montear2009@hotmail.com) IV Jornadas de Innovación Educativa de la Facultad de Ingeniería.

Mena, M., Rodríguez, L., Diez, M. L., “El Diseño de Proyectos de Educación a Distancia”, Editorial. Stella, Buenos Aires, 2005.

Rediseño del Programa de Probabilidad y Estadística de carreras de Ingeniería para potenciar el aprendizaje por competencias Lazarte, Ivanna Maricruz<sup>1</sup> y Díaz, María Cristina<sup>1</sup> Revista Codinoa N° 6 - Año 2020 ISSN: 1853-6662

Sistema Nacional de Documentación Histórica, guía general de digitalización de documentos. <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/sistemasnacionales/documentacion-historica/guia-digitalizacion>

# COMPLETADO DE DATOS MEDIDOS POR SENSORES DE HUMEDAD DE SUELO: CASO DE ESTUDIO EN ESTACION DE MONITOREO AUTOMÁTICA (EMA) DE LA RED IHREDA

Christian A. Mancino<sup>a,b</sup>, Raúl E. Rivas<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr Eduardo Usunoff”, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA.

<sup>b</sup>Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, ARGENTINA.

e-mail: [cmancino@ihlla.org.ar](mailto:cmancino@ihlla.org.ar)

## RESUMEN

Es común que ocurra la discontinuidad de datos meteorológicos y de superficie debido, principalmente, a desperfectos técnicos de las EMAs. El objetivo de este trabajo es mostrar la capacidad de completar datos faltantes de una EMA a partir de otras EMAs. El caso de estudio comprende 3 EMAs: La Alcira (37°29'57''S-58°54'32''O, 186m.s.n.m) que monitorea las condiciones de desarrollo de un cultivo de cebada y las EMAs de la red IHREDA EM45 (37°17'12"S-58°57'30"O; 155m.s.n.m.) y EM42 (37°26'2.19"S- 59° 6'41.22"O; 290m.s.n.m.) ambas sobre pastura natural (vertiente sur del río Salado, provincia de Buenos Aires). Todas las estaciones son de balance de energía donde se mide principalmente la temperatura y humedad relativa del aire, precipitación, radiación neta, y el contenido volumétrico del agua en suelo (VWC, por sus siglas en inglés), entre otras. Para el caso de estudio se completaron datos (21 días) en el período de invierno-primavera de 2020 (127 días) del VWC. El VWC se determina a partir de la permitividad dieléctrica del medio (modelo sensor CS655). En el análisis se consideraron las precipitaciones y sus correlaciones. Los sensores fueron instalados a distintas profundidades [La Alcira:(8cm-30cm-60cm), EM45:(8cm-50cm) y EM42:(8cm-40cm)] según el desarrollo de los horizontes del suelo restringiendo el análisis matemático a la similitud de éstos. Se procedió a correlacionar los datos tomados a la misma hora en las 3 estaciones a partir de regresiones lineales. Una vez obtenidas las ecuaciones de correlación para cada profundidad se procedió al completado de datos faltantes en la EMA La Alcira. Las mejores correlaciones se dan entre VWC\_8cm-(La Alcira) y VWC\_8cm-(EM45)  $R^2=0.94$ ; entre VWC\_30cm-(La Alcira) y VWC\_40cm-(EM42)  $R^2=0.91$  y entre VWC\_60cm-(La Alcira) y VWC\_50cm-(EM45)  $R^2=0.94$ . Se concluye que, es importante tener un buen conocimiento de perfil edáfico de estas estaciones de tal manera de no caer solo en una mera correlación matemática.

Palabras Clave: Correlación, sensor CS655, Permitividad, Contenido Volumétrico, Propiedades Edáficas

## INTRODUCCIÓN

La red de monitoreo IHREDA se ideó para dar una respuesta a la problemática ambiental de la provincia de Buenos Aires ([www.ihreda.com.ar](http://www.ihreda.com.ar)) en el marco de la convocatoria de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) Fondos Sectoriales (FONARSEC/2013 MAyCC). La red de monitoreo contiene 31 EMAs distribuidas en la vertiente sur del río Salado (40.000 Km<sup>2</sup>), región agro-productiva donde residen unos 500.000 habitantes (ver Fig. 1a).

La cuenca presenta características propias de llanura, con pendientes del orden del 1% donde predominan los flujos verticales respecto a los horizontales. El 85% del agua que precipita se va por los procesos de evaporación y transpiración, el 10% por infiltración y el 5% restante por escurrimiento superficial. El clima es templado cálido, con heladas en invierno y primavera. Las precipitaciones disminuyen hacia el sur-oeste de 1000 a 700 mm anuales. Estas son más intensas en primavera y otoño, pudiendo producirse déficit hídrico durante el verano.

El caso de estudio comprende 3 EMAs ubicadas en el partido de Tandil (ver Fig. 1b): Una estación móvil en la Ea. La Alcira ( $37^{\circ}29'57''\text{S}-58^{\circ}54'32''\text{O}$ , 186 m.s.n.m) que monitorea las condiciones de desarrollo de un cultivo de cebada y las EMAs de la red IHREDA EM45-Ea. La Lucila ( $37^{\circ}17'12''\text{S}-58^{\circ}57'30''\text{O}$ ; 155 m.s.n.m.) y EM42-Ea ambas instaladas en abril del 2018. El Parque ( $37^{\circ}26'2.19''\text{S}-59^{\circ}6'41.22''\text{O}$ ; 290 m.s.n.m.) ambas instaladas en pasturas naturales (ver Fig. 2).

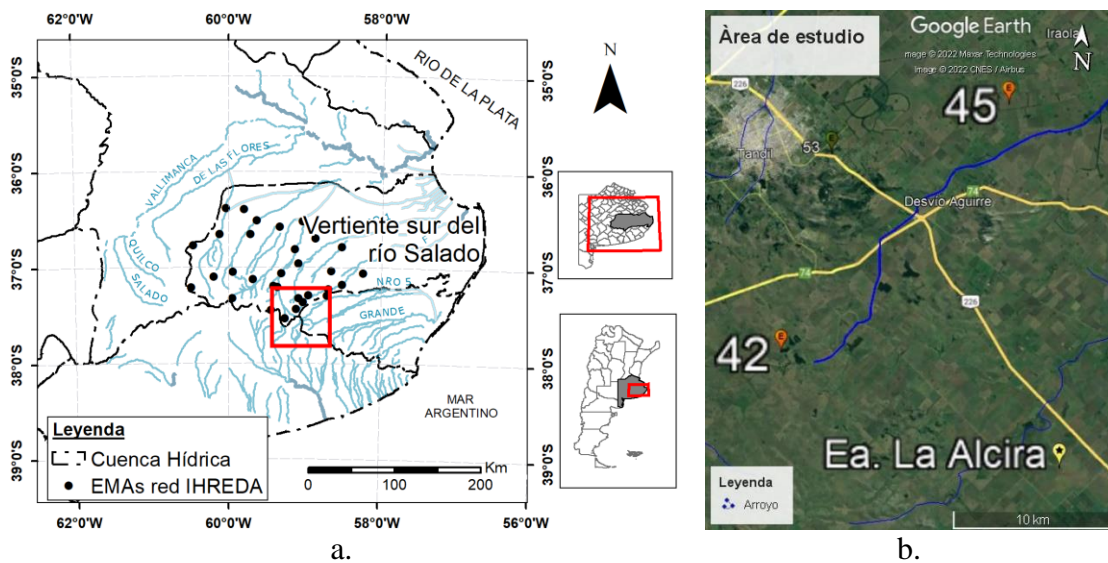


Figura 1. a. Ubicación de las EMAs. de la red IHREDA en la cuenca del Salado. b. Ubicación de las estaciones mostrando solo las que se usaron en este trabajo: EM42 y EM45 (red IHREDA) y La Alcira (estación móvil).



Figura 2. Parcela con cebada (izquierda) y entorno de las EMAs (centro y derecha).

Las estaciones son de balance de energía, en ellas se mide principalmente la radiación neta entrante y saliente de la superficie, la temperatura y humedad relativa del aire, la precipitación, el nivel freático y el contenido volumétrico del agua en suelo (VWC, por



sus siglas en inglés), entre otras variables (para mayor detalle ver en Rivas R. y Mancino C., 2020). En la Tabla I se muestra una comparación de las variables físicas que mide cada estación.

Tabla I. Variables físicas de superficie que mide cada estación (entre paréntesis la unidad y entre corchetes el código comercial de cada sensor).

Variable física que se mide, unidades y modelo del sensor	Estación de Monitoreo Ambiental		
	La Alcira	El Parque	La Lucila
Precipitación e intensidad (mm) [PMB25]		x	x
Precipitación (mm) [TE525MM]	x		
Velocidad y dirección del viento (m/seg) [Windsonic4 2D]	x	x	x
Temperatura (°C), y Humedad relativa del aire [%] [CS215]	x	x	x
Presión atmosférica (hPa) [CS100]		x	x
Nivel Freático (m), y temperatura del agua subterránea (°C) [CS451]		x	x
Radiación Neta (W/m <sup>2</sup> ) [CNR4]	x		x
Radiación Global (W/m <sup>2</sup> ) [CMP3]		x	
Contenido volumétrico (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ), Conductividad (dS/m), Permitividad (..) y Temperatura del suelo (°C) [CS655]	x	x	x
Contenido volumétrico (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ), Conductividad (dS/m), Permitividad (..) y Temperatura del suelo (°C) [SoilVUE10]	x		
Reflectancia espectral reflejada e incidente (W/m <sup>2</sup> nm) [SRS-Nr, SRS-Ni]	x	x	x
Flujo de calor en el suelo (W/m <sup>2</sup> ) [HFP01]	x	x	x
Temperatura Radiativa de superficie (°C) [SI-111]	x	x	x

Es común que ocurra la discontinuidad de datos debido principalmente a eventos climáticos extremos, a desperfectos técnicos de las EMAs, rotura de sensores y es por ello por lo que el objetivo de este trabajo es mostrar la capacidad de completar datos faltantes de una EMA a partir de otras EMAs periféricas.

## MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

El CS655 es un sensor multiparamétrico que mide el contenido volumétrico de agua, la conductividad eléctrica, la permitividad dieléctrica y la temperatura, en los suelos o en otros medios porosos. Para los fines prácticos de este trabajo solo se correlacionó el contenido volumétrico de agua (entre 0,10 a 0,40 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) variable de relevancia al momento de estimar la evapotranspiración real del sistema suelo planta.

El contenido volumétrico de agua se deriva de la sensibilidad del sensor a la permitividad dieléctrica del medio que rodea las varillas de acero inoxidable. El CS655 está configurado como un reflectómetro de contenido de agua, con dos varillas paralelas formando una línea de transmisión abierta. Un circuito oscilador diferencial está conectado a las varillas, con un cambio de estado del oscilador activado por el retorno de

una señal reflejada desde una de las varillas. El tiempo de viaje bidireccional de las ondas electromagnéticas que son inducidas por el oscilador en la varilla varía con el cambio de la permitividad dieléctrica. El agua es el principal contribuyente a la permitividad dieléctrica del suelo o medios porosos, por lo que el tiempo de viaje de la onda reflejada aumenta al aumentar el contenido de agua y disminuye al disminuir el contenido, de ahí el nombre de reflectómetro de contenido de agua. El tiempo de viaje promedio de la onda reflejada multiplicado por un factor de escala de 128 se denomina promedio del período. El promedio del período se informa en microsegundos y se considera que es la producción bruta de un reflectómetro de contenido de agua (Campbell Sc. Inc., 2021). Estos parámetros son medidos a lo largo de la longitud de sus varillas, que en el caso de este modelo es de 12 cm de longitud. Las varillas del sensor se pueden insertar verticalmente en la superficie del suelo o enterrarse en cualquier orientación de la superficie (Rivas y Mancino, 2020). El volumen sensible depende de los medios circundantes. En el suelo, el volumen sensible se extiende aproximadamente 8 cm desde las varillas a lo largo de su longitud y 4,5 cm más allá del extremo de las varillas (Campbell Sc. Inc., 2021).

Se realizaron 2 calicatas para la instalación de la torre de comunicación de la red IHREDA y se aprovechó a realizar una descripción del suelo. Los suelos de la EM42 y la EM45 en sus primeros 30 y 40 cm respectivamente son limo arcilloso que luego pasan a arcillo limoso. En la Fig. 3 puede verse las calicatas realizadas y las variaciones edáficas del suelo.

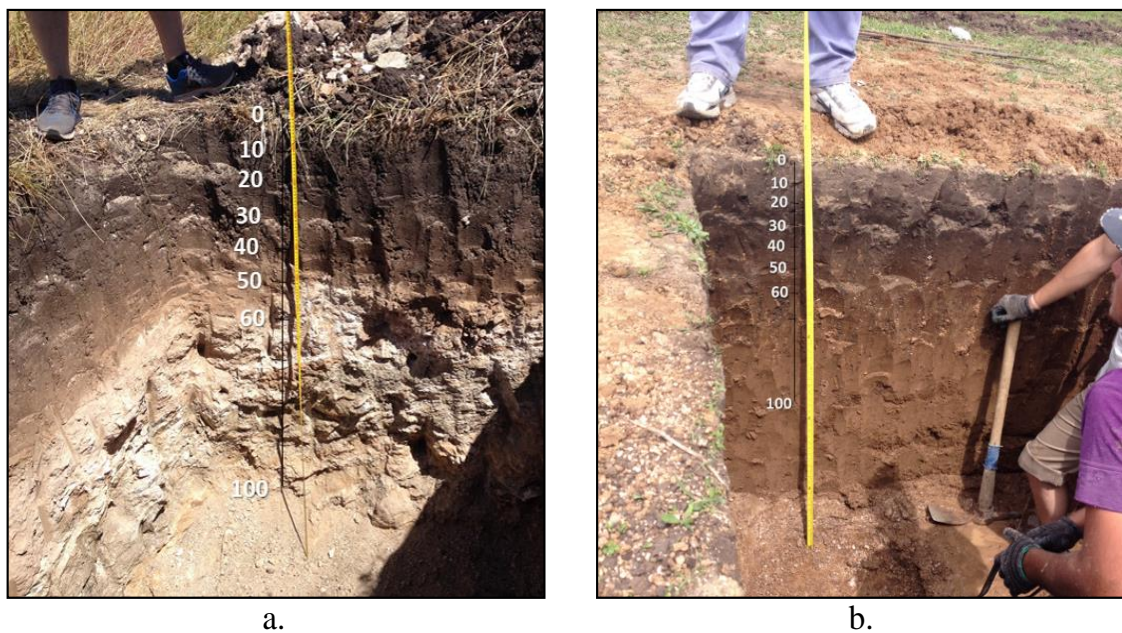


Figura 3. Perfil de suelo en: a. Ea. El Parque (EM42) y b. Ea. La Lucila (EM45).

En La Alcira en cambio, se realizó un muestreo del suelo cada 10 cm con barreno, en el artículo de Olivera *et al.*, 2021 puede verse los alcances de este muestreo. Luego se analizaron las muestras en laboratorio usando la adaptación del método de Bouyoucos (L Grion-G Piñeiro - Baldasini).

Los resultados de los análisis se encuentran en la Tabla II.

Tabla II. Análisis textural del suelo en La Alcira.

Muestra	% Arcilla	% Limo	% Arena	TEXTURA
0-10	25	52	22	Franco Limoso
10-16	42	40	17	Arcillo limoso
20-30	27	52	20	Franco Limoso
30-40	45	32	22	Arcilloso
40-50	40	42	18	Franco Arcillo limoso
50-60	40	42	18	Franco Arcillo limoso

Los sensores fueron instalados a distintas profundidades y orientaciones. En el caso de La Alcira se instalaron de forma horizontal a 8, 30 y 60 cm de profundidad, mientras que los sensores de la red IHREDA se insertaron de forma vertical: a 8 y 50 cm en la EM45; y a 8 y 40 cm en la EM42 (ver Fig. 4). Estos últimos sensores fueron instalados hace 4 años por lo tanto el perfil de suelo se encuentra similar a las condiciones naturales, sin flujos preferenciales.

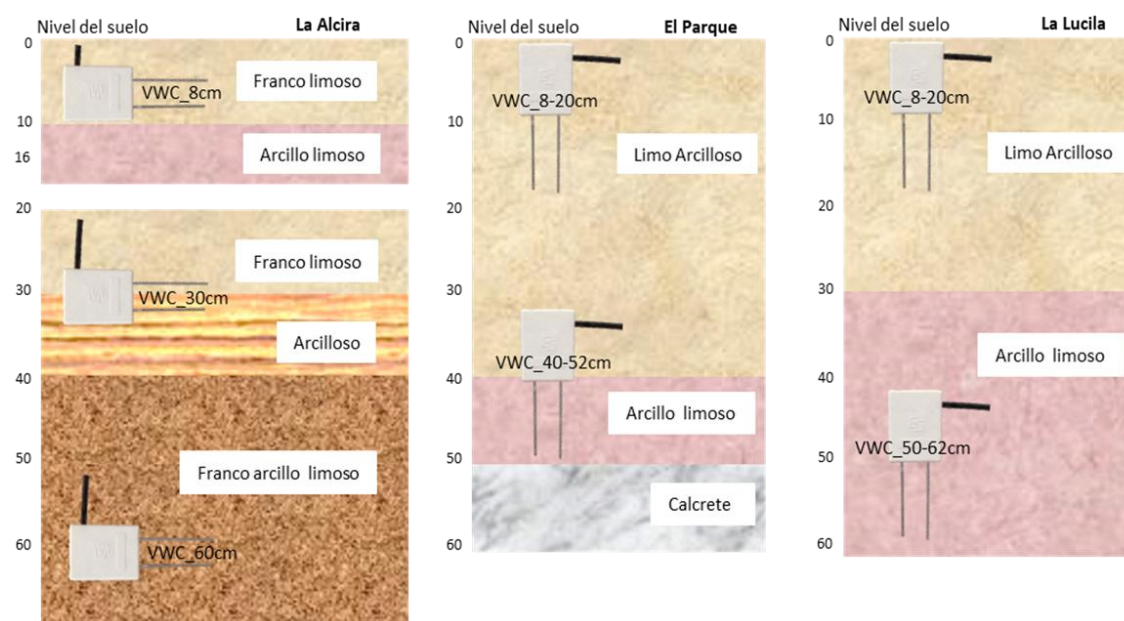


Figura 4. Comparación de los perfiles de suelo y ubicación de los sensores en las EMAs.

Para el completado de los datos se hicieron comparaciones entre datos medidos en las estaciones buscando el mejor ajuste y considerando en todos los casos la similitud de los horizontes de suelo de las estaciones.

Teniendo en cuenta estas características se procedió a correlacionar los datos de las diferentes estaciones a partir de regresiones lineales (en el eje x la estación usada de referencia para el ajuste y en el eje y la estación que se completa el dato). Se seleccionaron valores del contenido volumétrico de suelo medidos a la misma hora (8:50 AM) de las 3 estaciones, distribuidos en todo el periodo de registro de la EMA La Alcira. Dentro de

ese rango se seleccionaron los valores extremos para cada sensor para abarcar una mayor dispersión de los datos y un número reducido de valores intermedios (ver Tabla III).

Tabla III. Valores extremos de contenido volumétrico en suelo.

Estación	La Alcira			(EM42) El Parque		(EM45) La Lucila	
	8	30	60	8	40	8	50
Profundidad (cm)	8	30	60	8	40	8	50
VWC Mínimo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,08	0,20	0,19	0,19	0,27	0,26	0,15
VWC Máximo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0,19	0,36	0,35	0,36	0,42	0,40	0,38

Para el caso de estudio se completaron datos del VWC de 21 días de un total de 127 días en el período de invierno-primavera de año 2020. Complementariamente se consideraron las precipitaciones y sus correlaciones.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 5 se pueden observar las dispersiones logradas entre las estaciones y los mejores ajustes con sus ecuaciones.

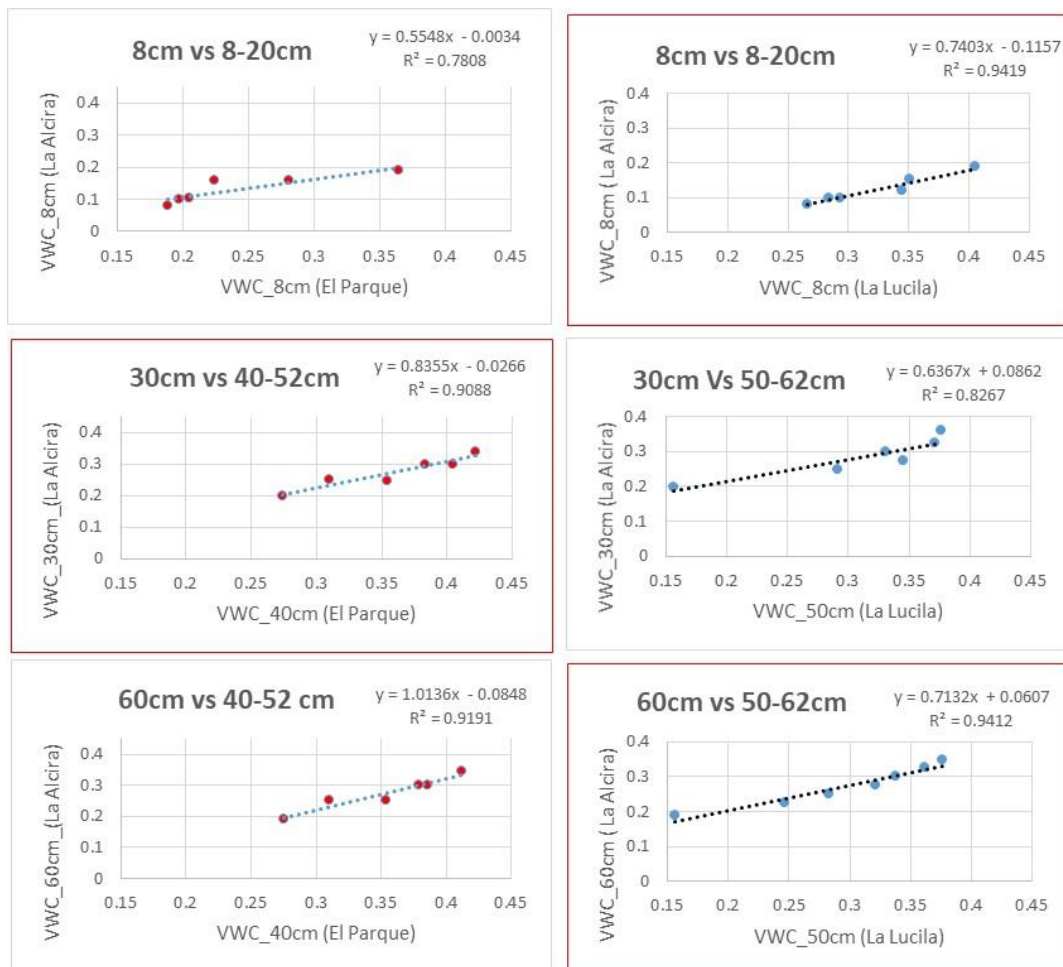


Figura 5. Gráficos de correlación entre el contenido volumétrico de agua en suelo (VWC) de La Alcira con El Parque y con La Lucila. Los gráficos con recuadro rojo indican la mejor correlación.

Las mejores respuestas se observan entre VWC\_8cm-(La Alcira) y VWC\_8cm-(EM45)  $R^2=0.94$ ; entre VWC\_30cm-(La Alcira) y VWC\_40cm-(EM42)  $R^2=0.91$  y entre VWC\_60cm-(La Alcira) y VWC\_50cm-(EM45)  $R^2=0.94$ , (ver Tabla IV).

Tabla IV. Valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y las ecuaciones usadas para la correlación.

La Alcira	El Parque		La Lucila	
	VWC_8cm	VWC_40cm	VWC_8cm	VWC_50cm
VWC_8cm	0.78		<b>0.94</b> $y = 0.7403x - 0.1157$	
VWC_30cm		<b>0.91</b> $y = 0.8355x - 0.0266$		0.83
VWC_60cm		0.92		<b>0.94</b> $y = 0.7132x + 0.0607$

Una vez identificadas las mejores correlaciones, se aplicaron las ecuaciones de regresión para obtener los valores faltantes de humedad en el perfil de suelo de la EMA La Alcira. En la Fig. 6 se muestran los gráficos de los datos completados en el cual se observa que han tenido un ensamble aceptable para los 21 días faltantes.

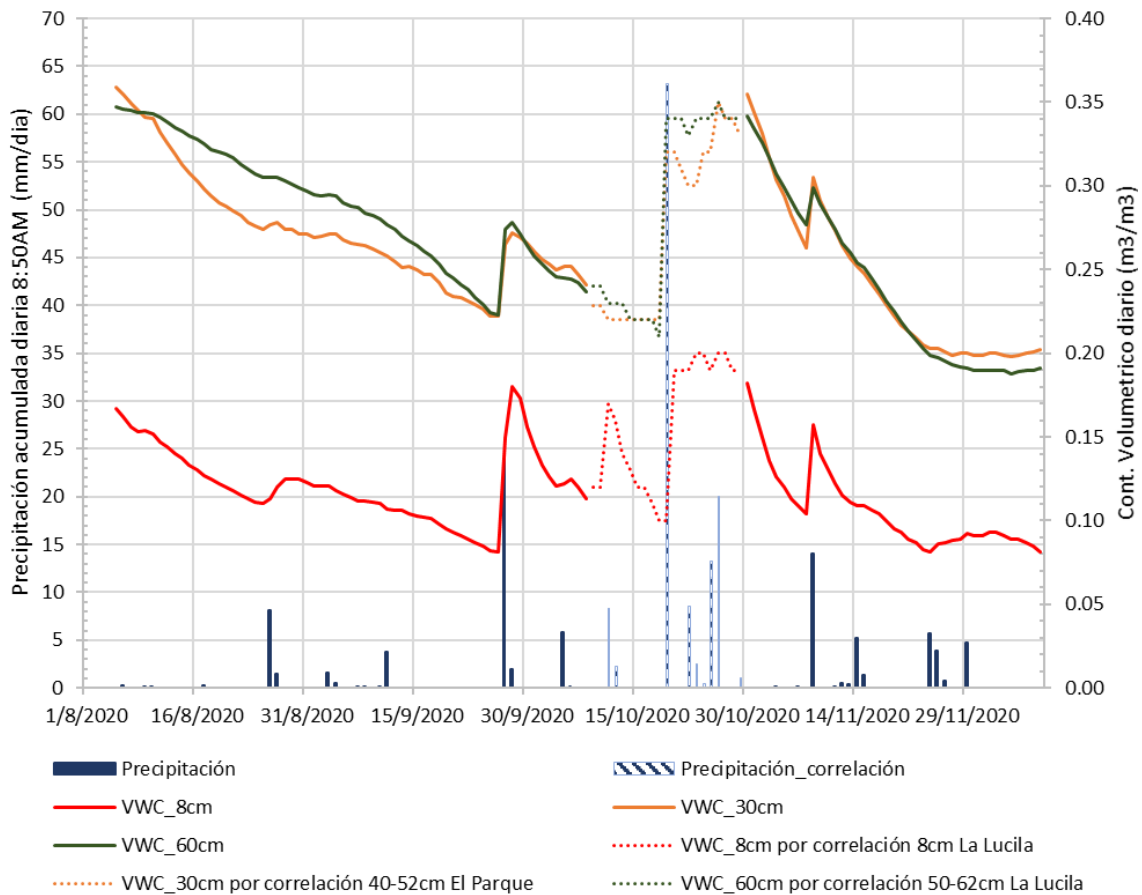


Figura 6. Comportamiento del contenido volumétrico de agua en suelo (línea llena) y precipitación (diagrama de barras lleno) de la EMA La Alcira incluyendo el relleno de los datos faltantes con datos de las EMAs de la red IHREDA (línea punteada y diagrama en barra rayado).

## CONCLUSIONES

En el trabajo se completan datos faltantes, de humedad de suelo estimada a partir de la permitividad dieléctrica, de una estación que monitorea un cultivo de cebada a partir de regresiones sencillas logradas de estaciones cercanas. Los ajustes logrados presentan un coeficiente de determinación alto ( $> 0,91$ ) que es consecuencia de la similitud de textura entre los horizontes de suelo correlacionados. Disponer de la información textural en donde se ubican los sensores de permitividad es fundamental al momento del completado de datos. También es importante tener en cuenta la variabilidad estacional en la zona de estudio, ya que en el invierno las precipitaciones son de carácter regional y no como ocurre en verano. Por lo tanto, las humedades se pueden trabajar por comparación sencilla, sin embargo, en verano se debería de tener precaución al momento de hacer comparaciones directas ya que no existe la seguridad de que las precipitaciones ocurran en todos los sitios de la misma forma.

Esta técnica se puede replicar a otras áreas donde se disponga de la información suficiente y los parámetros obtenidos pueden utilizarse para el completado de datos en suelos con horizontes similares a los descriptos en este trabajo.

## REFERENCIAS

- Campbell Sc. Inc. Instruction Manual. CS655/650 Water Content Reflectometers. Revision 11/2021. <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs650.pdf>. (2021).
- Olivera Rodriguez, P., Holzman, M. E., Mujica, C. R., Rivas, R. E., & Aldaya, M. M. Different Approaches to Assessing Pollution Load: The Case of Nitrogen-Related Grey Water Footprint of Barley and Soybean in Argentina. *Water*, 13(24), 3558 (2021).
- Rivas R. y Mancino C. MANUAL PARA EL DISEÑO DE UNA RED DE MONITOREO DE ALERTA DE INUNDACIONES Y SEQUÍAS, 108 páginas. 1ra Edición especial, La Plata, Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-987-98816-5-1. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/10710>. (2020).

# ANÁLISIS TERRITORIAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO RECONQUISTA. UNA VISION INTEGRAL DEL NORESTE BONAERENSE.

Mondelo, V. <sup>a</sup>, Mazzucchelli, M.G. <sup>a</sup>, Peroncini, V. <sup>a</sup> y Gaspari F.J. <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dirección General Ejecutiva del Comité de Cuenca del Río Reconquista (COMIREC).

<sup>b</sup>CEIDE. FCAyF-UNLP. ARGENTINA.

e-mail: [unidad.gestion@minfra.gba.gov.ar](mailto:unidad.gestion@minfra.gba.gov.ar)

## RESUMEN

*En la región pampeana, la intervención antrópica sobre los ecosistemas llevó a un proceso de degradación del suelo y alteración del régimen hídrico. La cuenca alta del río Reconquista (CARR), en la región de la Pampa húmeda bonaerense, que comprende llanuras, con un relieve muy suave, casi horizontal, donde la pendiente media es de aproximadamente 0,25 por mil, cuya altura decrece desde el oeste hacia el este. Esta topografía plana y características geomorfológicas particulares que favorecen al anegamiento de grandes áreas, que, sumado a la intervención antrópica, que contribuye a reducir y modificar el escurrimiento del agua, genera el incremento de la problemática de inundaciones. El objetivo del trabajo fue realizar un análisis territorial caracterizando el entorno ambiental y su relación con la susceptibilidad hídrica. La CARR abarca 103.176,67 ha y se ha analizado por medio del procesamiento de capas vectoriales de coberturas de suelo de FAO y de las características edáficas básicas y limitantes principales superficiales descriptas por el INTA. Dichos insumos fueron procesados, generalizando la tipología de la información contenida, agrupándolos en zonas similares, interpretándolas mediante geoprocesamiento de superposición espacial de la información definida. Las clases de uso del suelo contempladas fueron herbáceas cultivadas, pastizal cerrado, áreas urbanas y cultivos de especies arbóreas en secano, las cuales se integraron con las características edáficas superficiales como: drenaje y posición del terreno. El 72 % presenta uso de suelo agropecuario con presencia de pastizal y 23% con herbáceas cultivadas, siendo el resto de uso urbano-forestal, indicando paisajes con susceptibilidad hídrica alta-media en zonas pertenecientes a las riberas de los ríos o cercanas a los cuerpos de agua, media en zona de amortiguación de planicies y/o actividades agropecuarias y baja en perímetros urbanos, ya que se asume que estos poseen una adecuada planificación territorial para prevenir o mitigar eventos de inundación.*

*Palabras Clave: territorio, SIG, Suelos-Usos del suelo.*

## INTRODUCCION

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sostenible (Gaspari et al, 2009). Por ello es necesario conocer sus límites y la definición de sus características morfológicas, ambientales y de la sociedad que la integra.

Un enfoque sistémico del concepto de cuenca hidrográfica supera la idea de reducirla a una superficie de convergencia del escurrimiento hídrico superficial ya que considera a todo el complejo biogeomórfico y humano. Bajo esta concepción la cuenca hidrográfica representa un espacio físico tangible que permite la concurrencia integral y multisectorial (actividades económicas y productivas). La misma constituye un instrumento valioso del Estado y la sociedad para administrar su actividad, conciliar intereses económicos y sociales, conservar la biodiversidad y permitir un uso sostenido de los recursos naturales representando a una unidad de planificación y gestión para el Manejo de los Recursos Naturales (Gaspari et al., 2013).

En el estudio y planificación de una cuenca hidrográfica es indispensable la comprensión y aplicación del concepto de estabilidad para el buen uso y manejo de los recursos naturales. En la actualidad la presión del hombre sobre éstos es tan fuerte que su efecto sobre las características del medio puede, y de hecho hacen, que un ecosistema cambie por completo y su respuesta varíe en perjuicio del hombre y de los servicios ecosistémicos que aporta.

En las últimas décadas, los pastizales pampeanos han sido sustituidos por agroecosistemas dada la buena capacidad productiva de los suelos, evidenciando en la actualidad, un importante nivel de degradación y un escaso grado de conservación. Las zonas bajas del terreno conforman un flujo de agua que genera una corriente de agua que fluye con continuidad por un cauce en la superficie terrestre, como un río / arroyo, o bien puede ser subterráneo. Posee un caudal determinado, constante a lo largo del año o sino transitorio, cuando presenta menor porte. La parte final de un río es su desembocadura. Los ríos forman parte del ciclo hidrológico, a través de una cuenca hidrográfica donde conforma la dinámica del agua por la escorrentía superficial, infiltración y otras fuentes, como la recarga de agua subterránea, manantiales y la liberación de agua almacenada.

Esta intervención antrópica sobre los ecosistemas llevó a un proceso de degradación del suelo y alteración del régimen hídrico. La cuenca alta del río Reconquista (CARR), en la región de la Pampa húmeda bonaerense, que comprende llanuras, con un relieve muy suave, casi horizontal, donde la pendiente media es de aproximadamente 0,25 por mil, cuya altura decrece desde el oeste hacia el este. Esta topografía plana y características geomorfológicas particulares que favorecen al anegamiento de grandes áreas, que, sumado a la intervención antrópica, que contribuye a reducir y modificar el escurrimiento del agua, genera el incremento de la problemática de inundaciones.

El objetivo del trabajo fue realizar un análisis territorial caracterizando el entorno ambiental y su relación con la susceptibilidad hídrica.

## **ÁREA DE ESTUDIO**

El Río Reconquista, históricamente se denominaba Río de Las Conchas, hasta que, en 1954, alcanzó su denominación actual. Se ubica al noreste de la Provincia de Buenos Aires y abarca administrativamente 18 partidos del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA)<sup>1</sup> y de zonas rurales cercanas. Limita al noroeste con la cuenca del río Luján; al noreste con el mismo río Luján en la zona de su desembocadura en el Río de la Plata; al suroeste con la porción media y superior de la cuenca del río Matanza-Riachuelo.

---

<sup>1</sup> Territorialmente la Cuenca se compone de veintidós (22) municipios.



La cuenca cuenta con el Comité de la Cuenca Reconquista (COMIREC), dependiente de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Provincia de Buenos Aires, que es un ente autárquico que coordina y ejecuta acciones vinculadas con el saneamiento ambiental, la preservación del recurso hídrico y la mejora de la calidad de vida de los habitantes del Río Reconquista (<https://www.gba.gob.ar/comirec>).

La cuenca comprende 134 cursos de agua que recorren un total de 606 kilómetros, de los que 82 km corresponden al Río Reconquista. Las características de este río son típicas de un curso de llanura, y su caudal puede variar entre 69.000 m<sup>3</sup>/día y 1.700.000 m<sup>3</sup>/día.

El río Reconquista tiene su nacimiento en la confluencia de los arroyos La Choza y Durazno en el partido de Marcos Paz. Poco después se suma a estos el arroyo La Horqueta, último tributario aguas arriba de la represa Ingeniero Roggero que con su lago artificial (lago San Francisco) y construida en el límite de los partidos de General Rodríguez, Marcos Paz, Moreno y Merlo, es el límite de la **cuenca alta** (CARR), como se presenta en la Figura 1 y 2. Una vez formado el cauce principal, aguas debajo de la represa, solo recibe caudales de cierta importancia por parte de los Arroyos Las Catonas y Morón en la **cuenca media**. A partir de aquí comienza la **cuenca baja**.

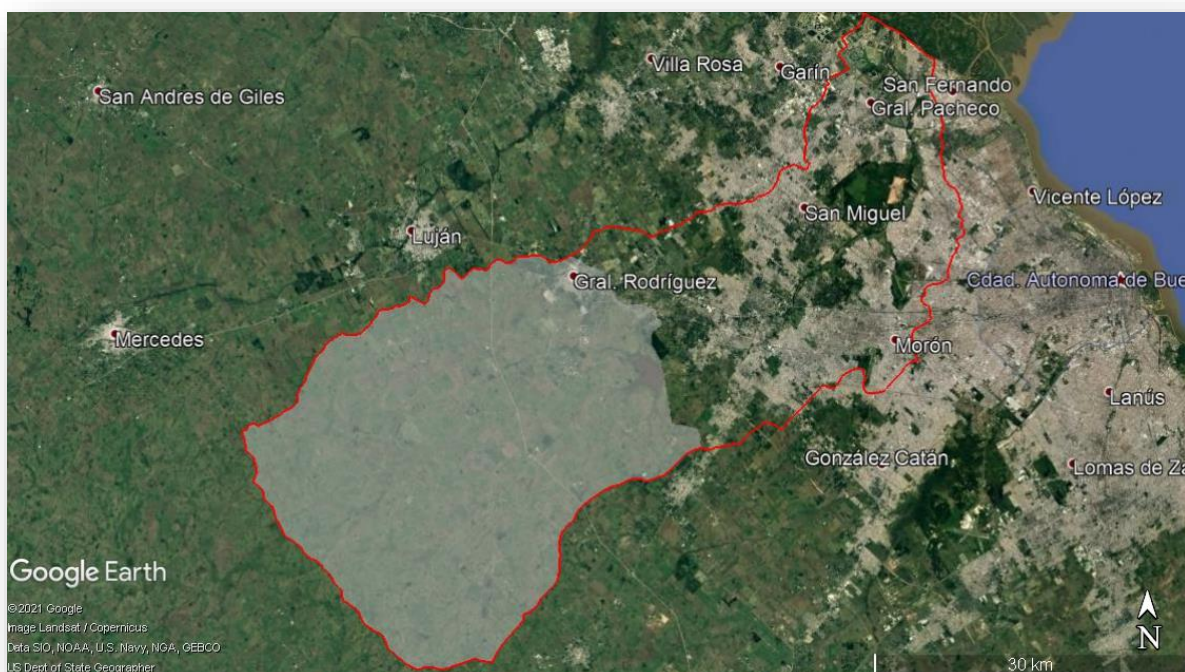


Figura 1. Ubicación de la CARR, marcado en gris, en Google Earth.

La porción de la cuenca alta del río Reconquista aguas arriba de la Presa Roggero (CARR) es el objeto del presente estudio, y se encuentra en la región de la Pampa húmeda bonaerense, que comprende llanuras, con un relieve muy suave, casi horizontal, donde la pendiente media es de aproximadamente 0,25 por mil, cuya altura decrece desde el oeste hacia el este. Presenta una predominante actividad agropecuaria, que no ha estado ajena a las problemáticas del sector rural de la región pampeana argentina de los últimos 30 años,

por ello, los recursos naturales directamente vinculados con la producción agropecuaria, que resultaron más afectados, fueron los suelos y el agua.

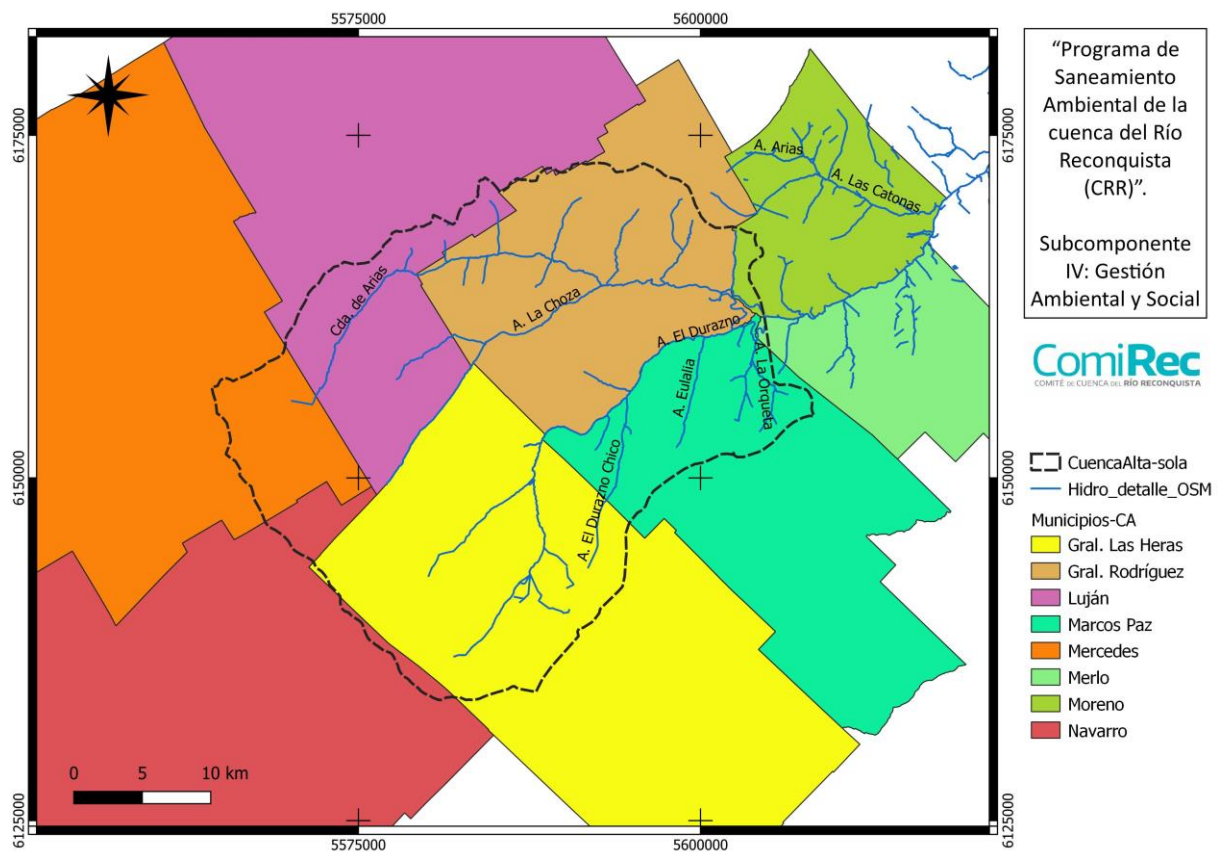


Figura 2. Municipios que conforman la CARR.

## MATERIALES Y MÉTODOS

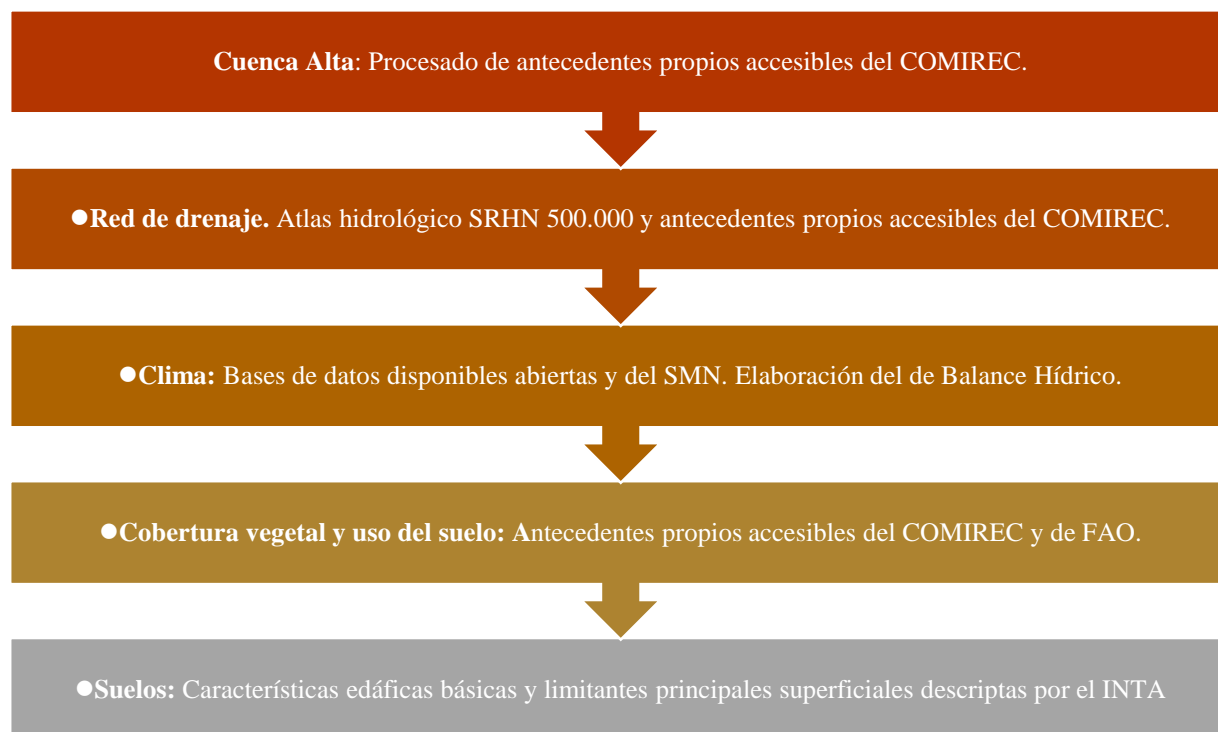
Una herramienta para realizar estudios que integren la influencia del cambio de usos del suelo y los servicios hidrológicos a nivel de cuenca hidrográfica, es la aplicación de análisis geoespaciales integrados en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG permiten estimar posibles modificaciones producidas en la cuenca por los cambios en la cobertura y uso del suelo, provocados por actividades antrópicas. Esta forma de abordar el estudio de la dinámica de uso del suelo por medio del análisis de imágenes satelitales, fotografías aéreas o imágenes de drones permite estimar el aumento y/o la disminución de la superficie cultivada en el tiempo.

La CARR abarca 103.176,67 ha y se ha analizado por medio del procesamiento el programa QGis 3.18, con el cual se trabajaron: el modelo de la NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)(2013)<sup>2</sup> que expresa el modelo digital de elevación (MED) (Farr, 2007), capas vectoriales de coberturas de suelo de FAO (2000) y de las características edáficas básicas y limitantes principales superficiales descritas por el INTA (1989).

<sup>2</sup> Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9445JDF>

Las capas temáticas procesadas con el SIG, y elaboradas para el presente estudio, se basaron en una secuencia denominada **Modelo Cartográfico** para el diagnóstico de los servicios hidrológico-ambientales que posee la cuenca alta del Río Reconquista para aportar a la sustentabilidad de la región. También se utilizó información del Instituto Geográfico Nacional, como base catastral y vial (IGN, 2009;2013).

Las capas analizadas y la secuencia de procesamiento fueron:



Dichos insumos fueron procesados, generalizando la tipología de la información contenida, agrupándolos en zonas similares, interpretándolas mediante geoprocesamiento de superposición espacial de la información definida.

## RESULTADOS

Los conocimientos referidos al relieve definido a partir del MED constituyen la base de la investigación referida al presente estudio, ya sea directa o indirectamente, de los paisajes, sus dinámicas y evolución; con lo cual esta información puede resultar de interés a diversas ciencias y las actividades antrópicas.

La distribución del SRTM en la CARR se presenta en la Figura 3, y fue obtenido a partir de un complemento disponible en QGis 3.18.3, el cual permitió descargar el MED y recortarlo a nivel de la cuenca.

Una combinación de métodos de visualización con el SIG fue utilizada para producir estas imágenes, basadas en códigos que relacionan la elevación con colores o tonos de gris. Las cotas que se identificaron se representan con color gris claro en la cabecera de la CARR y sobre las planicies de inundación, donde circulan los arroyos y ríos, se interpretan más oscuras, hacia el negro que son las cotas más bajas.

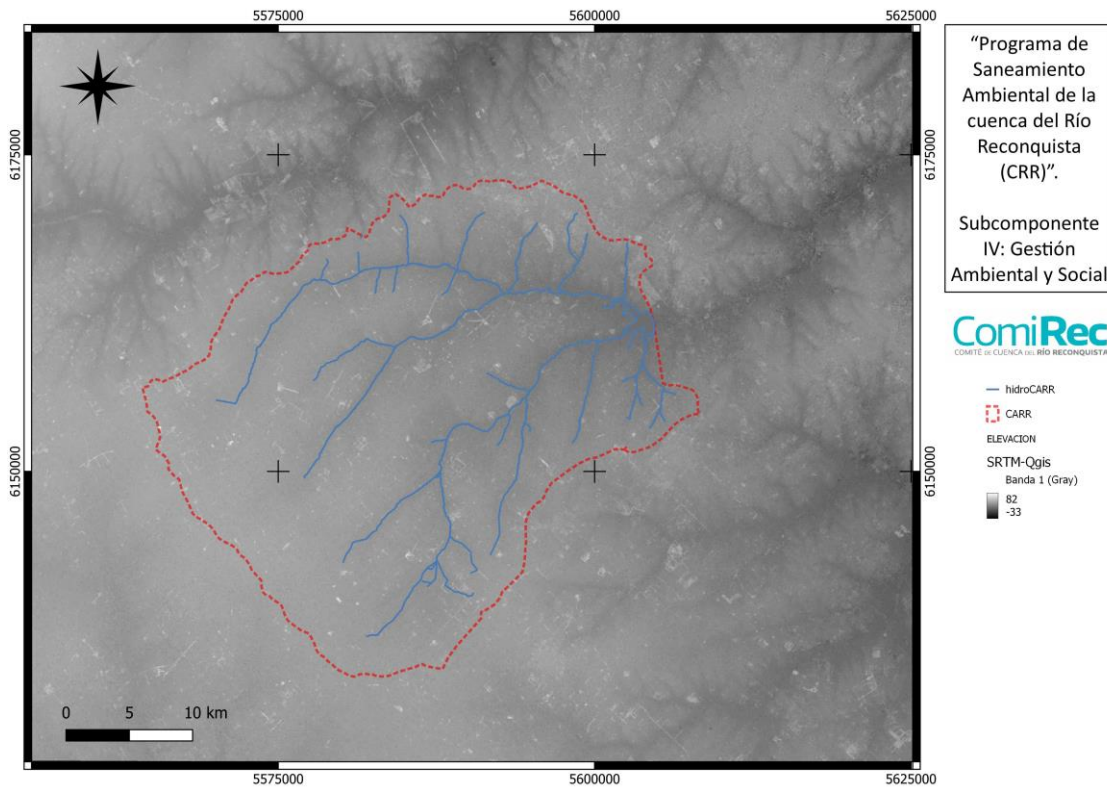


Figura 3. MED del SRTM con la CARR.

En relación la posición del suelo en el paisaje (relieve), este determina las propiedades de los suelos y consecuentemente su comportamiento. Cuando se caracteriza por pendiente, se refiere a la inclinación de la superficie del terreno, en las inmediaciones del lugar donde se describe el perfil edáfico.

La posición del suelo de la CARR que presenta relieve normal puede denominarse loma, el cual se presenta en el 37,41 %. Los paisajes más planos y representativos de la zona expresan un 38,6% de planicies y 5,18% planicies anegables. Los planos aluviales en los alrededores de los cursos de agua representan un 13,2% de la CARR y, por último, se identifican áreas poco definidas según su posición, que se denominan misceláneas y que son ocupadas por áreas urbanizadas en distinto grado (5,61%). Estas clases de posiciones del relieve se muestran en la Figura 4.

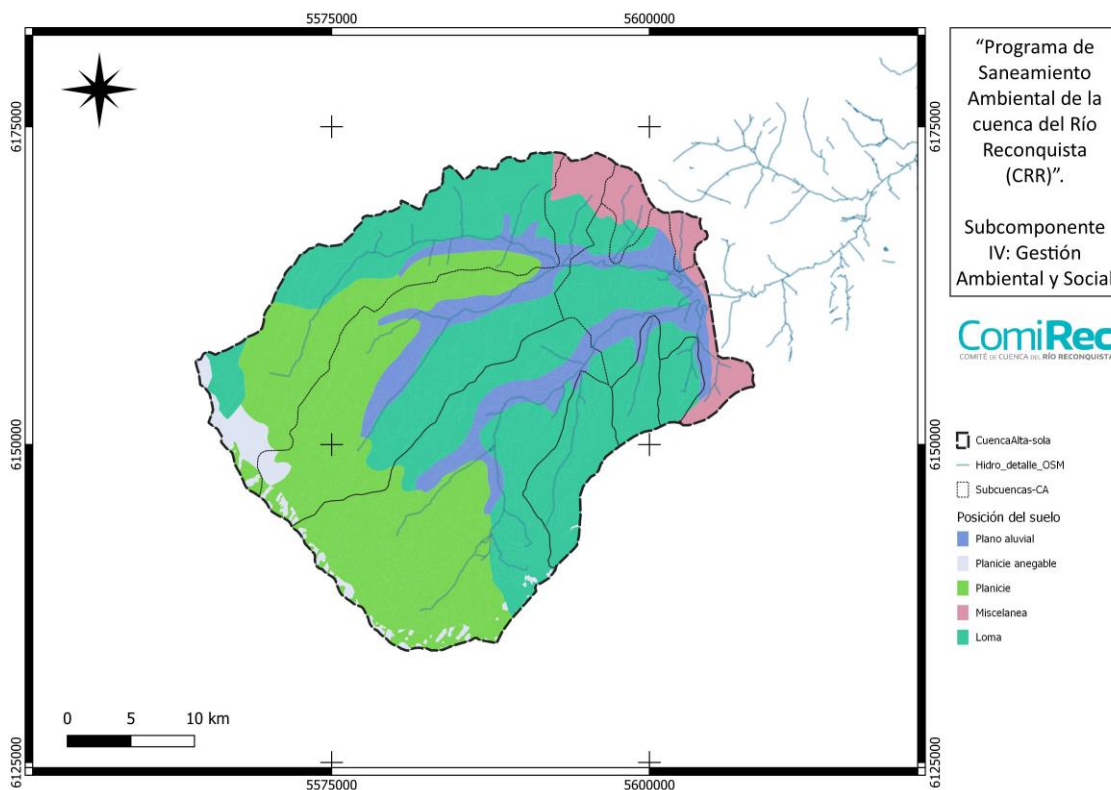


Figura 4. Detalle de posición del suelo en las subcuencas.

Las clases de uso del suelo contempladas fueron herbáceas cultivadas, pastizal cerrado, áreas urbanas y cultivos de especies arbóreas en seco, las cuales se integraron con las características edáficas superficiales como: drenaje y posición del terreno.

En la CARR se identifican áreas bien drenadas (37.927,3 ha), pobremente drenadas (39.133,03 ha) y 5.250,82 ha imperfectamente drenadas.

- **Drenaje bien drenado.** El exceso de agua se retira con facilidad, pero no con rapidez. El agua libre interna es comúnmente profunda o muy profunda; de duración anual no especificada. El agua está disponible para la vegetación durante la mayor parte de la estación de crecimiento en las regiones húmedas. Los excesos de humedad no inhiben el crecimiento de las raíces en períodos significativos durante la estación de crecimiento. Suelos sin síntomas de hidromorfismo en el solum. Corresponde típicamente a los suelos automórficos.
- **Drenaje pobre.** El suelo permanece saturado la mayor parte del tiempo, el agua es evacuada tan lentamente que el suelo está húmedo a escasa profundidad periódicamente durante la estación de crecimiento o permanece saturado por largos períodos de tiempo. El agua libre es frecuente a poca profundidad o en la superficie en la estación de crecimiento durante el tiempo suficiente para que la mayoría de los cultivos mesofíticos no puedan crecer a menos que el suelo se drene artificialmente. Sin embargo, el suelo no está húmedo de forma continua justo debajo de la profundidad de arado. Es habitual la presencia de agua libre a escasa profundidad. Esta capa freática es comúnmente consecuencia de una baja o muy baja conductividad hidráulica saturada, de lluvias casi continuas o de una combinación de ambas circunstancias. Corresponde a suelos hidromórficos ó hidro-halomórficos.

- **Drenaje imperfecto:** El agua libre o gravitante sale lentamente del suelo, el que permanece mojado por períodos significativos. Los perfiles presentan normalmente moteados en la parte inferior del horizonte A, o inmediatamente por debajo del mismo. Corresponde a integrados entre suelos hidromórficos y automórficos.

Según la clasificación climática de Köppen-Geiger (Strahler y Strahler, 1992) la región donde se ubica la CARR, se caracteriza por un tipo climático Cfa, corresponde a un tipo Mesotermal húmedo, o sea templado con lluvias todo el año y temperatura media del mes más cálido superior a 22 °C, sin grandes amplitudes de temperatura diaria ni anuales. Los gradientes de temperatura y humedad decrecen en el caso de las lluvias de noreste a suroeste y la temperatura de norte a sur ejerciendo una notable y desigual influencia a nivel de macrorregión pampeana.

Las precipitaciones oscilan entre los 980 y 1100 mm anuales, con valores ligeramente mayores para los meses de verano. La mayor intensidad de las lluvias en verano facilita el escurrimiento superficial con lo cual sólo un menor volumen del agua de precipitación penetra en el suelo.

La evaporación potencial oscila anualmente entre los 850 mm en el norte y 750 mm en el sur. En el este el exceso medio anual de agua alcanza los 100 mm, registrados entre mayo y setiembre, el que disminuye hacia el oeste y sur. El mayor almacenaje de agua en el suelo se produce en el invierno, mientras que, en verano, a pesar de existir mayor precipitación, se registran algunas deficiencias críticas, debidas al aumento de la evapotranspiración.

El balance hídrico de la CARR, representado por el Diagrama de Thornthwaite y Matter (Figura 5) muestra valores de P más altos en verano, los cuales permiten el uso de la humedad por el suelo, beneficiando a los cultivos. Además, en febrero se interpreta una posible recarga del agua del subsuelo. A principios del otoño es donde se producen los grandes excesos de agua en el perfil edáfico, que persisten hasta fines de la primavera. Opuestamente, los valores más altos de precipitación se presentaron en diciembre-enero el déficit hídrico por exceso evapotranspirativo.

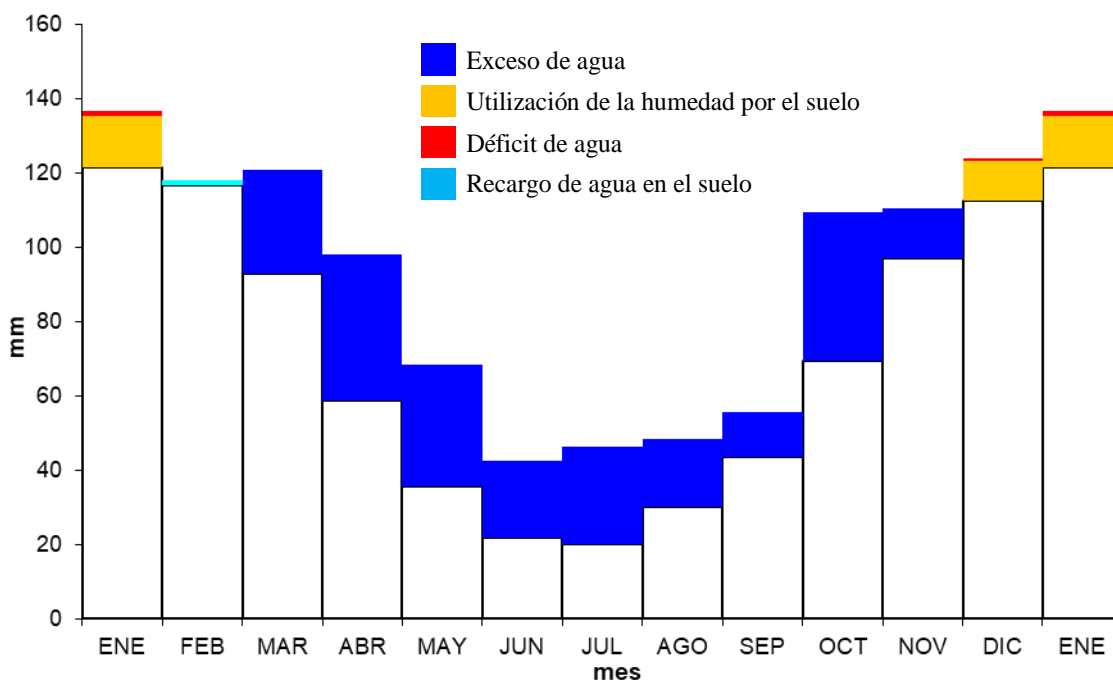


Figura 5. Diagrama de Balance Hídrico de Thornthwaite y Matter regional de la CARR.

En la CARR se diferencia sólo una ecorregión, la denominada D30 o Pampa ondulada. También conforma la región fitogeográfica pampeana, debido a que se extiende sobre llanuras horizontales o muy poco onduladas, con ríos de cauce lento y numerosas lagunas de agua dulce o salobre. El suelo es pardo o negro, con subsuelo de loess o de limo; hacia el oeste predominan los suelos arenosos.

De la aplicación de los conceptos formulados por el sistema de Clasificación de Cobertura de la Tierra de FAO (2005), en el área de la CARR definieron las coberturas expresadas en la Figura 6 y en la Tabla 1 se presentan sus respectivos porcentajes de ocupación.

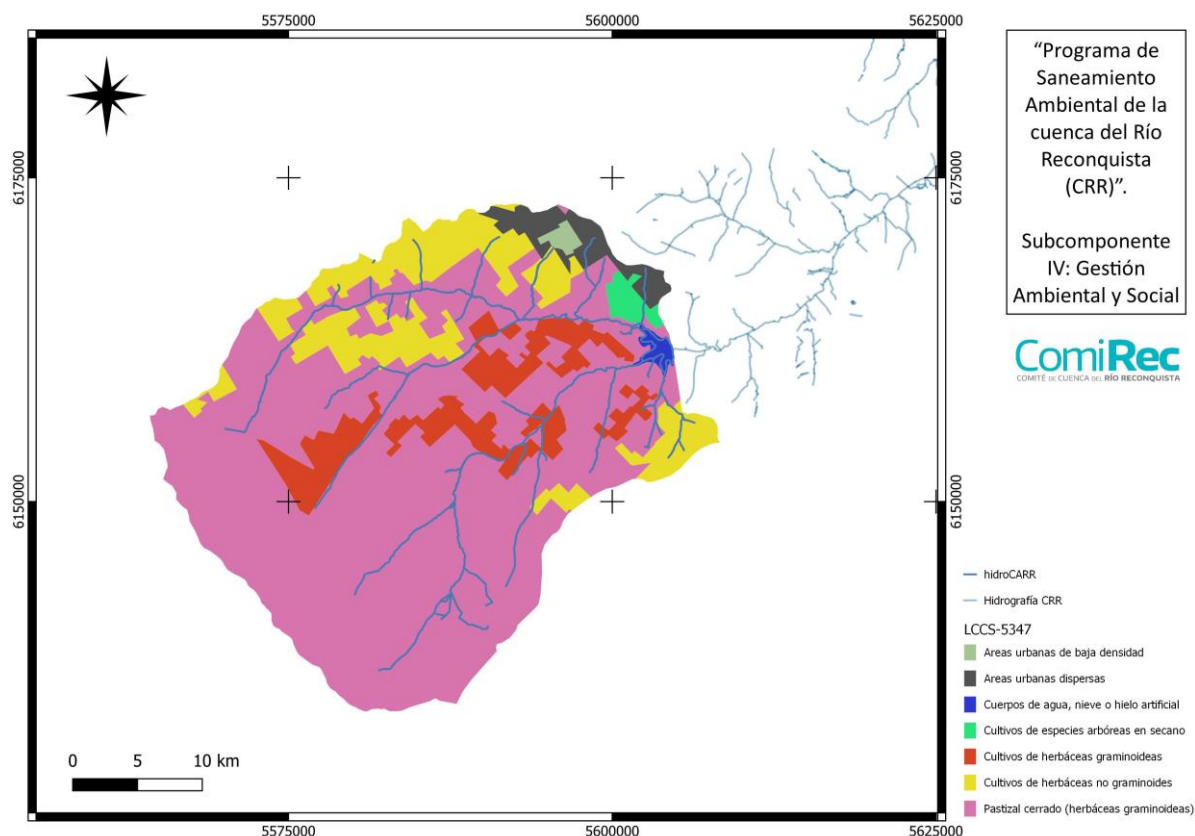


Figura 6. Distribución de usos del suelo según FAO (LCCS) en la CARR.

Tabla 1. Ocupación en superficie de los usos del suelo según FAO.

Descripción usos del suelo	Nivel_1	Nivel_3	Área de ocupación (ha)
Áreas urbanas de baja densidad		Tierras con uso urbano	446,5
Cuerpos de agua		Recursos hídricos de usos múltiples	595,6
Cultivos de especies arbóreas en secano	Tierras usadas para cultivos	Cultivo de leñosas no forestales en secano	1.002,0
Áreas urbanas dispersas		Tierras con uso urbano	2.914,6
Cultivos de herbáceas graminoideas		Tierras utilizadas para cultivos	9.938,1
Cultivos de herbáceas no graminoideas	Tierras utilizadas para cultivos	Tierras utilizadas para ganadería	13.989,3
Pastizal cerrado (herbáceas graminoideas)	Tierras usadas para ganadería	Ganadería Intensiva con predominio bovino para leche	74.290,6
<b>Total general</b>			<b>103.176,7</b>

El 72 % presenta uso de suelo agropecuario con presencia de pastizal y 23% con herbáceas cultivadas, siendo el resto de uso urbano-forestal, indicando paisajes con susceptibilidad hídrica alta-media en zonas pertenecientes a las riberas de los ríos o cercanas a los cuerpos de agua, media en zona de amortiguación de planicies y/o actividades agropecuarias y baja en perímetros urbanos, ya que se asume que estos poseen una adecuada planificación territorial para prevenir o mitigar eventos de inundación.

En el presente informe se utilizaron los mapas publicados en el Atlas de Suelos de la República Argentina (versión digital), los cuales fueron recortados al límite de la CARR. En las Figura 7 se representan los subgrupos de suelos que se encuentran distribuidos en la cuenca según su serie principal y símbolo cartográfico.

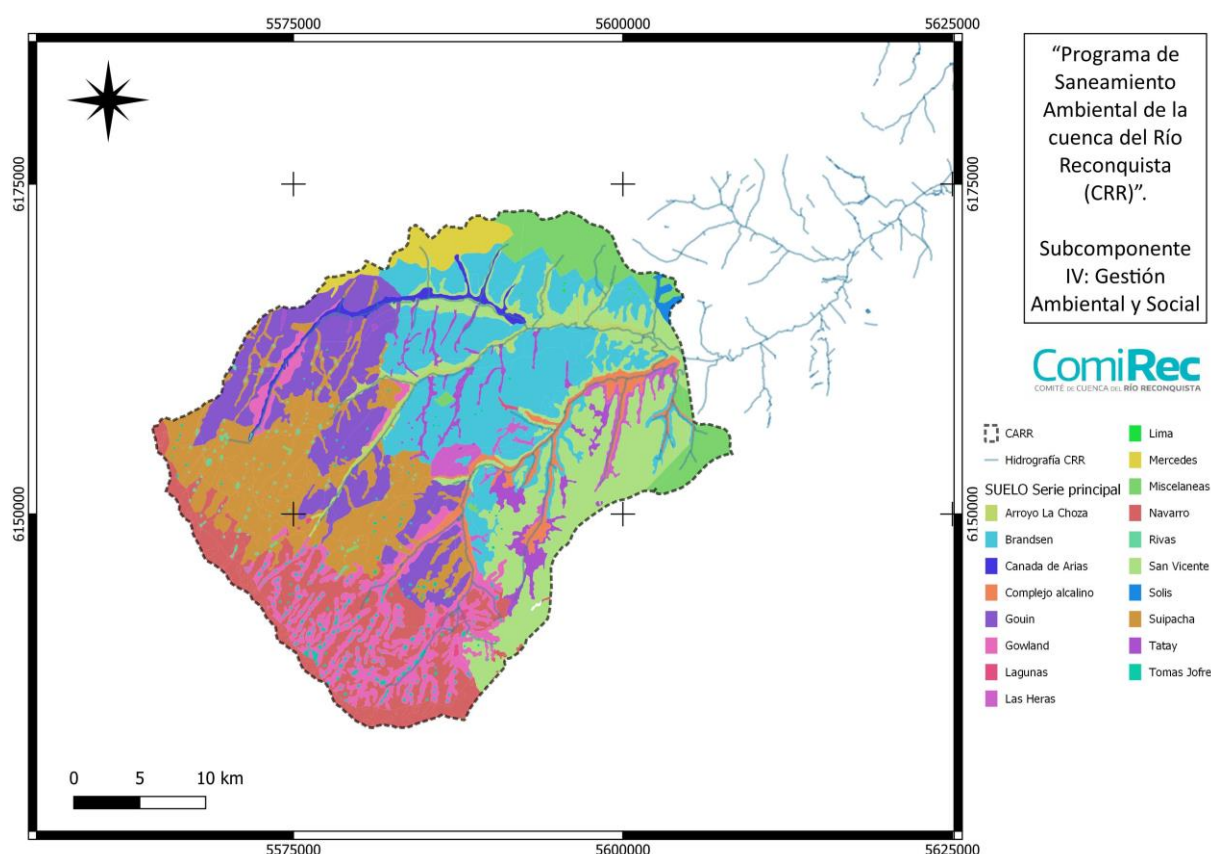


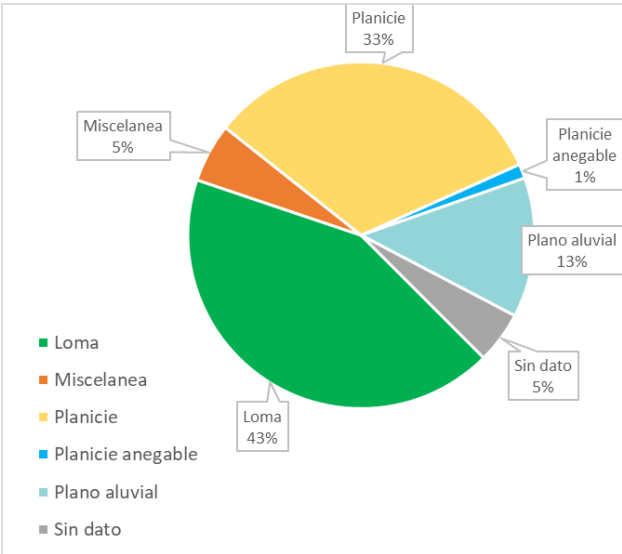
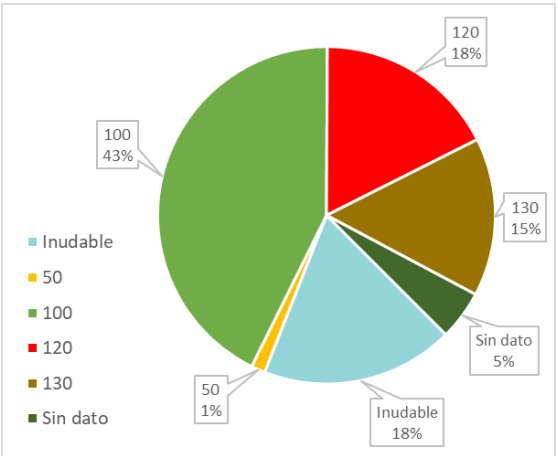
Figura 7. Distribución de subgrupos el suelo según INTA en la CARR.

Los suelos del área de estudio pertenecen al orden de los Molisoles, Alfisoles y complejos indiferenciados. Se han desarrollado principalmente bajo un régimen de humedad údico, con precipitaciones que superan a la evapotranspiración y distribuidas durante todo el año, y se corresponde a suelos de climas húmedos todo el año. Con respecto al régimen de temperatura edáfica denominado térmico. El tamaño de grano del material parental regional decrece de sudoeste (textura franco-limosa) a noreste (textura franco-arcillo-limosa) (Morrás, 2004). Los Molisoles son suelos con horizonte superficial oscuro y espeso (epipedón mólico), bien estructurado, con un contenido de materia orgánica superior al 1% y cuyo complejo de intercambio está saturado con más de 50% de bases, con dominio del calcio, magnesio, sodio y potasio.



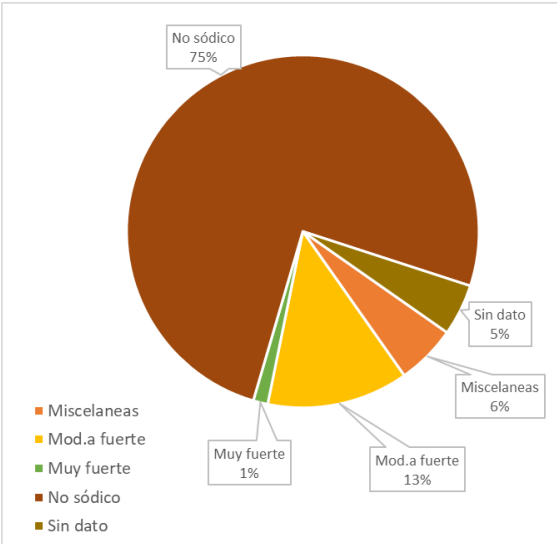
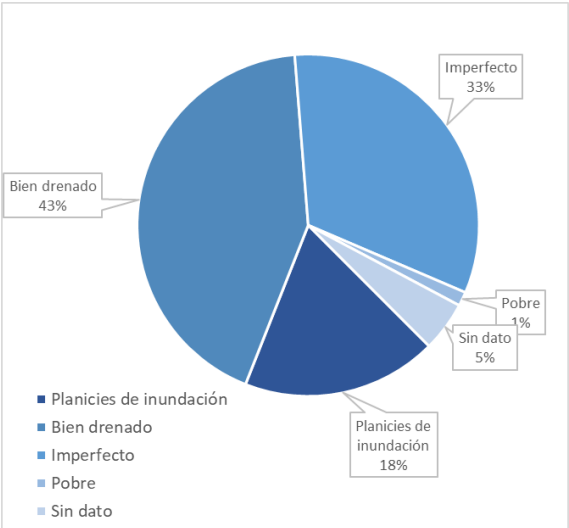
El orden de suelos Alfisol está relacionada con condiciones de drenaje limitado característico de los paisajes plano-cóncavo, anegables en la mayoría de los casos, apareciendo en los bordes de lagunas, microdepresiones y al pie de las pendientes de toda la región asociados a los Molisoles y a los Vertisoles. Son suelos bien desarrollados, saturados con bases, horizonte superficial delgado y claro con escaso contenido de materia orgánica, de estructura masiva y dura en seco (epipedón ócrico), seguido por un bien expresado horizonte subsuperficial derivado de un enriquecimiento secundario de arcillas.

En la Figura 8 se presentan las características básicas de los suelos en la CARR, lo cual indica un predominio de suelos con una profundidad de 100 cm, la posición del terreno es la loma, seguida por planicies; con un buen drenaje en esas áreas y empobreciéndose hasta imperfecto drenaje en áreas bajas y del tipo moderado alcalinidad, sin presencia de suelos sódicos. Se reconoce que no es una limitante la erosión hídrica o eólica, ni la rocosidad.



PROFUNDIDAD DEL SUELO

POSICION DEL TERRENO



DRENAJE SUPERFICIAL

ALCALINIDAD

Figura 8. Caracterización edáfica de suelo según INTA en la CARR.

Los factores limitantes son aquellas propiedades y características del medio geográfico que influyen en el desarrollo de los cultivos, es decir son aquellas propiedades y características del medio o entorno geográfico que en un momento determinado influyen negativamente en el desarrollo de los cultivos. Son el resultado de características edafológicas y de procesos de degradación del suelo por influencia antropogénica.

## CONCLUSIONES

La realización del análisis territorial en la cuenca alta de río Reconquista, se desarrolló caracterizando el entorno ambiental y permitió realizar su relación con la susceptibilidad hídrica. La CARR presenta un ambiente productivo activo, especialmente de uso ganadero con forrajes diversos. El uso con aptitud agrícola/ganadera se corresponde a unidades donde el suelo, clima y otros factores de incidencia agronómica permiten obtener cosechas permanentemente.

Las tierras no presentan limitaciones o si las tienen son leves y se solucionan con simples prácticas de manejo y conservación de suelos para mantener su productividad. Generalmente son suelos profundos, medianamente o bien provistos de materia orgánica, neutros, bien drenados, bien estructurados, con buena disponibilidad de nutrientes minerales, desarrollados en terrenos relativamente altos y de pendientes suaves y con adecuada disponibilidad de agua. Constituyen los sectores de mayor potencial agropecuario.

El procesamiento con SIG permitió zonificar y caracterizar la cuenca en forma geoespacial y de manera sencilla con datos disponibles en la web y en redes de información cartográfica.

## REFERENCIAS

REFERENCIASFAO. 2000. Land Cover Classification System (LCCS). Classification Concepts and User Manual for software version 1.0. By A. Di Gregorio and L.J.M. Jansen. Rome.

Farr, T. G. et al., 2007, The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183. (Also available online at [http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM\\_paper.pdf](http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf))

Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A. y Besteiro S.. 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Primera Edición. La Plata. 321 p.

Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, MI, Besteiro, S. 2013. Elementos metodológicos para el Manejo de Cuencas Hidrográficas. Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. 188 p. La Plata. Argentina. ISBN 978-950-34-0963-3. Versión digital. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/27877>

Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2009). Disposición marco POSGAR07 No.20/2009. [http://ramsac.ign.gob.ar/posgar07\\_pg\\_web/documentos/Disposicion\\_Marco\\_POSGAR\\_07.pdf](http://ramsac.ign.gob.ar/posgar07_pg_web/documentos/Disposicion_Marco_POSGAR_07.pdf). 3pp

Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2013). Base de datos geográfica. Límites políticos administrativos y centros poblaciones. <http://www.ign.gob.ar/sig>

Instituto Nacional de Tecnología Agrícola (INTA). 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires (escala 1:500.000). Buenos Aires, Argentina. 345 p.

Morrás, H; B Bonel & R Michelena. 2004. Características microestructurales del horizonte superficial de algunos suelos pampeanos bajo siembra directa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Actas en CD-R.

# AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL NA EXTRACÇÃO DO MÁRMORE BRANCO (EMPRESA ROCAFRIK), DA BIBALA. ANGOLA

Alexis M. Risco<sup>a</sup>, David M. Calenga<sup>b</sup>, Mayda U. Carcassés<sup>c</sup> y Suraymi G. Cruz<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería Civil, UO, Universidad de Oriente, Cuba

<sup>b</sup>Departamento de Metalurgia, Escola Superior Politécnica do Namibe, Cuba

<sup>c</sup>Departamento de Minas, Universidad de Moa, ISMM, Cuba

e-mail: [amrisco23@gmail.com](mailto:amrisco23@gmail.com)

## RESUMEN

*Avaliação de Impacto Ambiental serve para identificar, prevenir e interpretar os impactos ambientais que um projecto produzirá em seu ambiente, se ele for executado, para que a administração competente possa aceitá-lo, rejeitá-lo ou modificá-lo. Diz-se que há impacto ambiental quando uma acção ou actividade produz uma alteração, favorável ou desfavorável, no ambiente ou em qualquer um dos componentes do ambiente. O objectivo desta pesquisa é identificar, caracterizar e avaliar o impacto ambiental na extracção de Mármore Branco (Rocafrik), Povoação de Caraculo/Município da Bibala, para propor medidas que minimizem e corrijam os efeitos negativos. Como parte do trabalho, os diferentes impactos ambientais que ocorreram durante a extracção do mármore foram identificados, caracterizados e avaliados e, finalmente, foi elaborado um plano de medidas para a prevenção, mitigação e correcção dos efeitos negativos. A partir dos resultados do trabalho, sabe-se que os factores ambientais que geram os impactos mais negativos das diferentes actividades são: atmosfera, flora e fauna, água, solo e paisagem. Com o objectivo de minimizar os impactos gerados pela exploração da pedreira, as medidas propostas atendem às necessidades que os problemas ambientais demandam e sua eficiência dependerá de sua correta implementação.*

Palabras Clave: Avaliação de Impacto Ambiental, Mármore Branco, Mitigação e correcção dos efeitos negativos.

## INTRODUCCIÓN

A mineração é uma actividade necessária, porque se você quer desenvolver a agricultura (tão necessária em si mesma) ou a pesca, se você quer viver em cidades e não em cavernas; você precisa de ferramentas, matérias-primas e aditivos para o solo, que possibilitem a realização dessas actividades humanas. (Oyarzun, 2008).

Angola é um país particularmente rico em recursos minerais. Ainda assim, uma parte importante do potencial de extracção está por confirmar, científica e empiricamente. O conhecimento geológico disponível localiza os recursos em rochas ornamentais, fundamentalmente, em duas províncias da República de Angola (Namibe e Huíla). A província do Namibe é caracterizada por uma grande variedade de ocorrência de minerais não-metálicos. No que respeita aos mármore, há muita dificuldade em estimar as suas reservas não só devido à escassez e debilidade dos estudos existentes, os quais não permitem tirar conclusões nesta matéria, mas também porque um estudo deste tipo se torna muito difícil, dada a complexidade das principais ocorrências o que origina que

nem mesmo uma campanha de sondagens permitirá tirar conclusões de grande fiabilidade sobre as quantidades de mármore comercialmente aproveitáveis.

Ao decorrer de muitas décadas a extracção de mármore branco, tem se firmado como uma actividade que, além de gerar empregos e ser fonte extra de renda para as populações locais e residentes mesmas áreas, os efeitos ambientais estão associados, de modo geral, às diversas fases de extracção deste mineral, como à abertura da cova, (retirada da vegetação, escavações, movimentação de terra e modificação da paisagem local), o uso de máquinas de grande porte (sobrepessão atmosférica e vibração do terreno).

Na povoação do Caraculo, Município da Bibala, Província do Namibe é onde existe o maior suporte de actividade de extracção do mármore branco, a exploração do mineral tem como perspectivas a melhoria de condições sociais desta população, também é uma actividade que causa enormes impactos ambientais, muitos destes irreversíveis.

Como situação problemática desta investigação, propõe-se que na extracção do mármore branco (empresa Rocafrik), povoação de Caraculo/Município da Bibala, a concessionária não tem um plano para reabilitar os possíveis efeitos ambientais que ocorrem quando se explora o referido mineral. Uma abordagem desta situação problemática demonstrou a existência do seguinte problema da investigação: A necessidade de realizar uma avaliação de impacto ambiental na extracção do Mármore Branco (empresa Rocafrik), povoação de Caraculo/ Município da Bibala, minimizar seu impacto no meio ambiente. Com vista a resolver este problema, propõe-se como objectivo geral da investigação, realizar uma avaliação do impacto ambiental na extracção do Mármore Branco (empresa Rocafrik), povoação de Caraculo/Município da Bibala, a fim de propor as medidas preventivas e correctivas que devem ser adoptadas para minimizar o impacto sobre o meio ambiente, a fim de tornar a exploração compatível com a preservação do meio ambiente natural.

## MÉTODOS

### Caracterização do município da Bibala e da povoação de Caraculo

O município da Bibala, tem 7 612 km<sup>2</sup> e cerca de 64 504 mil habitantes conforme censo 2014 (Figura 1).



Figura 1. Localização do Município da Bibala, earth. Google.com/acessado, 29 de Julho de 2017. (Governo Provincial do Namibe 2014).

É limitado a Norte pelo município de Camucuo, a Este pelos municípios de Quilengues, Cacula, Lubango e Humpata, a Sul pelo município do Virei, e a Oeste pelo município de Moçâmedes, é constituído pelas comunas de Bibala-Sede, Caitou, Lola e Kapagombe. Cujas densidade é de 7 hab/km<sup>2</sup>.

A povoação de Caraculo esta situada a 70 km de Moçâmedes e tem as seguintes confrontações: A Norte com a povoação do Munhino; a Sul com o município de Moçâmedes; a Este com o município do Virei e a Oeste com a Comuna do Bentiaba.

Nos dias de hoje a situação torna-se ainda mais complexa, porque aumentou o número de empresas exploradoras de Mármore. Com o aumento do número de empresas e da exploração de mármore a mesma vem afectando significativamente a biodiversidade da localidade. Existem estudos realizados na área do Caraculo para mitigar os danos da extracção contra a fauna, flora, e na qualidade do meio, a localidade do Caraculo é uma reserva parcial que suporta o parque nacional do Yona.

O Eng. Chivela (técnico do IDF, Junho 2017), afirmou que as espécies animais como as espécies arbustivas, estão praticamente esgotadas, devido a forma de exploração que a localidade está a sofrer. Devido a forma descontrolada da exploração, os animais vão a áreas longínquas e há uma perda das plantas existentes na localidade devido a remoção dos vegetais que cobrem as rochas existentes na localidade.

### **Caracterização da Empresa Rokafrik e do ambiente biótico na pedraira.**

A Empresa Rokafrik está composta por dois sectores principais: o sector dos Recursos Humanos e finanças e o sector de extracção e exploração, corte de chapas e britadeira na pedraira para acomodação dos trabalhadores encontra-se um refeitório, um dormitório e um escritório, parque de máquinas e viaturas, wc etc. A empresa conta com 20 funcionários sendo os mesmos técnicos de funcionários da mina situada na Serra da Lua.

Na localidade em estudo existe uma variedade de espécies que comporta a biodiversidade da mesma. Fez-se um estudo que certas espécies animais como arbustivas já não se encontram na localidade, devido a forma como os homens estão a tratar a área. Podemos destacar algumas espécies arbustivas existentes na localidade:

*Tribulus terrestris* (fig.2), *Jatropha curcas*, *Acácia etbaica*, *Acácia erubescens*, *Acácia gassweileri*, *Acácia giraffae*, *Acácia melífera*, *Acácia subalata*, *Acácia tristis*, *Adenium bohemium*, *Balanites angolensis*, *Cambretum imberbe*, *Cammiphora mollis*, *Colophospermum mopane* (Mutiaty) (fig.3), *Dischrostachys cineraria*, *Euphorbia conspícua*, *Grewia welwistchii*, *Hoodia parviflora*, *Maprounea africana*, *Pachipadium lealli*, *Salvadora pérsica*, *Sterculia quinqueloba*, *Terminalia prunioides*, *Terminalia sericea*, *Adansonia digitata*, *Aloé angolensis*, *Anisophillea gassweileri*, *Aristida* sp, *Berchemia discolor*, *Boscia* sp, *Cammiphora virgata*, *Cammiphora* sp, *Chloris* sp, *Croton* sp, *Diospyros mespiliformis*, *Eragrostis superba*, *Ficus* sp, *Aristida rhiniochloa*, *Aristida subacaulis*, *Aristida ssp*, *Aristida prodigiosa* (Governo Provincial do Namibe 2014).

Quanto aos animais temos a dizer que o Caraculo é uma reserva parcial que dá suporte de animais ao parque Nacional do Yona. Uma vez que a área em estudo está sobre ameaças ambientais, devido os factores poluentes existente na localidade devido a exploração do granito, essas explorações danifica a biodiversidade da área o mal uso das técnicas usadas neste sector.



Figura 2. Tribulus terrestris, Fonte: Autor Outubro 2014.



Figura 3. Colophospermum Mopane, Fonte: Autor Outubro 2017

### Actividade de extracção na pedreira

O sector de exploração do mármore caracteriza-se, pela existência de duas sub actividades: exploração (fig.4) (Processo de retirar das jazidas qualquer mineral) e transformação, sendo seguidamente descrito a fases da exploração.

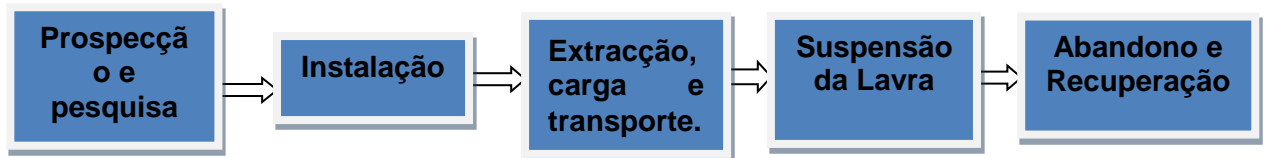


Figura 4. Fases da exploração do mármore

### Impactos ambientais produzidos pela actividade de mineração na pedreira

A Tabela 1 mostra as principais actividades da pedreira, os factores que são afectados por essa actividade e seu impacto no meio ambiente.

Tabela 1. Impactos ambientais produzidos pela actividade de mineração na pedreira.

Acção / Actividade	Factores que são afectados	Impacto
Prospecção e pesquisa	Solo Flora e fauna Paisagem	Remoção de vegetação e desmatamento Alteração da qualidade visual Alteração do habitat natural Deslocamento de fauna

Instalação	Solo Flora e Fauna Paisagem Atmosfera Águas subterrâneas	Alteração da qualidade visual Emissão de gases e poeira para a atmosfera Emissão de ruído e vibrações Remoção de vegetação e desmatamento Alteração do habitat natural e deslocamento da fauna Alteração do nível freático
Extracção, carregamento e transporte de material	Atmosfera Paisagem Solo Águas subterrâneas Flora e fauna	Alteração da qualidade visual Emissão de gases e poeira para a atmosfera Emissão de ruído e vibrações Alteração da qualidade da água Alteração do nível freático Remoção de vegetação e desmatamento Alteração do habitat natural e deslocamento da fauna

### **Trabalho de campo, entrevistas e determinação da amostra**

A realização deste trabalho foi de 12 meses divididos em varias fases desde a selecção do tema, colecta de dados, visita ao local de investigação, compilação dos dados, analise e discussão e por último a apresentação em prova pública. A empresa Rocafrik está composta por três sectores principais: o sector de produção, sector da Administração e Finanças e Comercial. A empresa conta com 20 funcionários (tabela 3) sendo os mesmos 14 técnicos do sector produção, 3 guardas, 3 senhoras domesticas, perto da pedreira há uma população de cerca de 25 pessoas, a pedreira dista a 15 km do centro populacional do Caraculo.

### **Determinação da amostra**

Para a determinação do número de amostras, foi aplicado o método de amostragem estatística aleatória simples através dos seguintes passos: (Montes de Oca, 2017):

#### **1. Determinação do grau de confiabilidade**

Foi assumido um grau de confiabilidade de 95%, portanto:  $z = 1,96$

#### **2. Determinação do valor do erro assumido no cálculo**

Porque o tamanho da população é igual a 45, estamos trabalhando com valores de N maiores que 10, então assumimos um erro de 5%, então:  $\epsilon = 0,05$

#### **3. Determinação do valor da probabilidade que a amostra possui de não possuir as mesmas qualidades da população.**

Como o tamanho da população é 45, aplicando a tabela para os valores de q, assume-se que trabalha com 1%, então:  $q = 0,01$

4. Cálculo da probabilidade de que a amostra tenha as mesmas qualidades da população

Obtido o valor de q, p pode ser determinado pela expressão:  $p = 1 - q$ , então  $p = 0,99$

5. Cálculo do tamanho da amostra teórica

Na expressão  $(n_0 = (z/\epsilon) * p * q)$  os valores de cada variável são substituídos para determinar o valor de  $n_0$  e obtém-se que  $n_0 = 15,21$

6. Cálculo do tamanho real da amostra

Na expressão  $(n = n_0 / (1 + n_0 / N))$  os valores de cada variável são substituídos para determinar o valor de n e é obtido que  $n = 12$

Ao aplicar o método estatístico, um tamanho de amostra de 12.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Resultados dos componentes ambientais impactados na pedreira

Os levantamentos feitos aos moradores e observação direta. Pudemos confirmar que os fatores ambientais identificados atingiram mais de 70% dos critérios, considerando que são os que mais recebem impactos em decorrência das ações realizadas na extração do mármore (Tabela 2).

Tabela 2. Impactos identificados por cada meio e componentes envolvidos no projeto.

Médio	Componente	Elemento	Impacto Ambiental
ABIÓTICO	SOLO	PAISAJEM	Diminuição das características da paisagem
			Modificação de paisagem
		GEOFORMAS	Processos de remoção em massa
		SOLO	Geração de processos de erosão e deslizamentos de terra
			Mudanças nas características físicas, químicas e bacteriológicas do solo
			Perda e alteração da camada de solo fértil
			Compactação crítica do solo
	Risco de material fraturado		
	HÍDRICO	ÁGUA SUPERFICIAL	Mudanças nas características físico-químicas e bacteriológicas das águas superficiais
		ÁGUA SUBTERRANEA	Desvio de águas subterrâneas
	ATMOSFÉRICO	QUALIDADE DO AR	Diminuição da qualidade do ar devido a gases e poeira
Aumento no nível de ruído e vibrações			



Médio	Componente	Elemento	Impacto Ambiental
BIÓTICO	ECOSSISTEMA TERRESTRE	COBERTURA VEGETAL	Mudança na disponibilidade de habitats devido a uma diminuição na cobertura vegetal
			Perda de espécies de plantas exóticas
		FAUNA SILVESTRE	Migração de espécies
			Mudanças na composição da vida selvagem / alteração de habitats.
SOCIOECONÔMICO.	ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E CULTURAIS	DEMOGRAFÍA ECONOMÍA POLÍTICO ORGANIZATIVO CULTURAL	Geração de fontes de emprego
			Risco aumentado de doenças
			Serviços públicos
			Vias de acesso
			Finanças do Estado

Após a determinação dos impactos produzidos sobre os fatores ambientais, a avaliação de cada impacto é feita levando-se em conta os indicadores propostos pelo (Conesa, 1997). A partir da análise da avaliação de cada um dos impactos, levando em consideração os indicadores propostos em sua ponderação. Um total de 21 impactos foram obtidos, dos quais apenas quatro foram classificados como positivos. O resto é de natureza negativa (gráfico 1 e 2).

### **Identificação e análise dos impactos através da matriz de impacto de Leopold.**

Etapa de preparação da terra

Na tabela 3 temos os impactos detectados no processo de preparação da pedreira, analisamos esses resultados tomando apenas os valores totais e presentes na tabela a seguir:

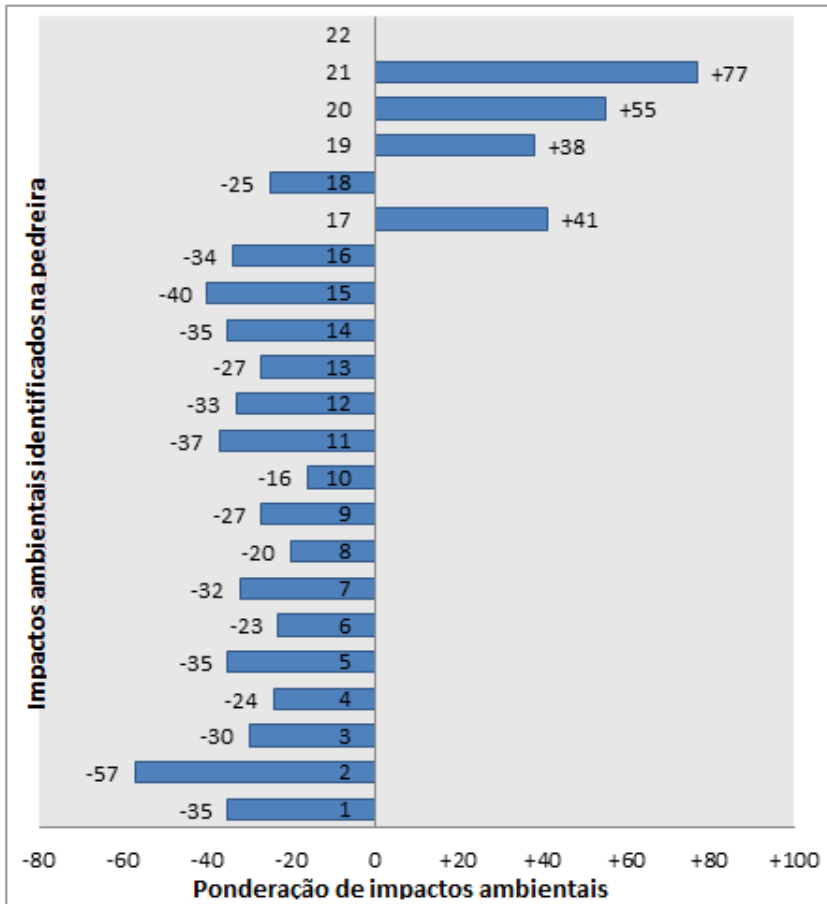


Gráfico 1. Ponderação de impactos ambientais

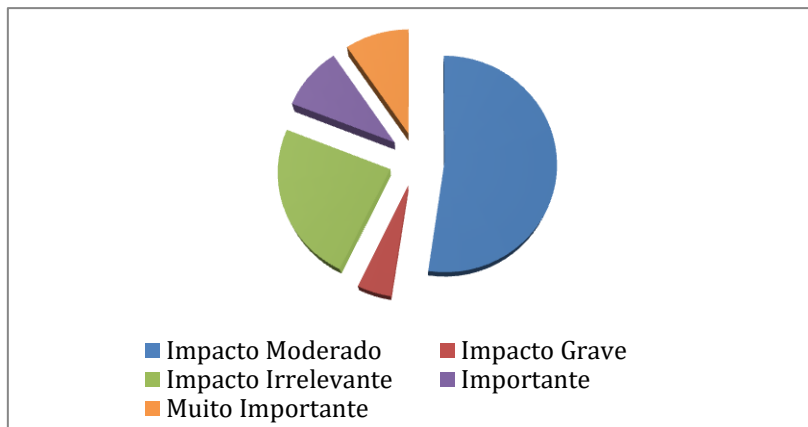


Gráfico 2. Avaliação dos impactos produzidos na pedreira.

Tabela 3. Impactos Ambientais na etapa de Preparação da Terra

Componente Ambiental	Valor Impacto	Observações
Destruição ou alteração da paisagem	-57	Ocorre no início da limpeza da terra e do trabalho de adaptação, bem como a habilitação do armazenamento da rocha e do acampamento.
Migração de Espécies	-40	As poucas espécies vegetais migrarão devido ao barulho e à perda de seu habitat.
Destruição do habitat, fauna	-34	Ao iniciar operações com a limpeza da terra, a cobertura vegetal é perdida.
Perda e alteração da camada de solo fértil	-23	A remoção da camada fértil, bem como as actividades de mineração no depósito implicam mudanças na geomorfologia de algumas considerações. Este impacto é considerado importante, uma vez que ocorre a curto prazo e de forma irreversível.
Impacto Médio Global	-38,5	Impacto negativo no etapa de Preparação da pedra.

#### Etapa de Extração

Na fase de extração do mármore é onde ocorrem os impactos com maior proporção e afetam quase todos os fatores ambientais considerados. A tabela 4 identifica os maiores impactos em ordem decrescente.

Tabela 4. Impactos Ambientales na etapa de Extração.

Componente Ambiental	Valor Impacto	Observações
Destruição ou alteração da paisagem	-57	A extração da rocha necessariamente causará modificação da paisagem devido à alteração da fisiografia, portanto a qualidade da paisagem diminuirá. Por outro lado, as escombrelas produzem contrastes discordantes entre este material e a vegetação circundante.
Migração de Espécies	-40	É um impacto irreversível, porque as espécies sensíveis ao ruído, afastando-se em busca de um habitat onde possam se desenvolver, dificilmente retornam a um local contaminado.
Destruição Habitat, fauna	-34	A limpeza da cobertura vegetal, remoção de terra terá repercussão na fauna já que perceber essas actividades afeita diretamente a fauna que utiliza este recurso, pois dela depende alimentar-se, aninhar-se e refugiar-se.
Ruído, vibrações	-33	É um impacto que afetará principalmente os trabalhadores e a população circunvizinha, é produzido como resultado do uso de explosivos, maquinário e o próprio trabalho de exploração. São fontes potenciais de ruído, compressor,

		explosivos, empilhadeiras para manuseio da rocha, o trânsito de caminhões basculantes, tudo isso aumenta a possibilidade de doenças respiratórias pela geração de poeira.
Erosão, deslizando	-24	Como resultado de detonações, a "superfície da terra na vizinhança da explosão sofre um deslocamento e a amplitude desta dependerá da energia liberada pelos explosivos e das condições geológicas locais". Conseqüentemente, é possível que a erosão e deslizamentos de terra, pois o material fraturado pode ser removido a qualquer momento.
Cobertura Vegetal de Destruição	-23	A execução dessa tarefa no início das operações terá repercussões na fauna que vive nesse setor.
Riscos devido a material fraturado	-20	O risco é latente dado o tipo de trabalho a ser executado onde os explosivos serão usados, embora as especificações técnicas sobre o assunto tenham sido consideradas, o perigo devido ao material fraturado exista e todas as precauções devam ser tomadas.
Impacto Médio Global	-33	Impacto negativo na etapa de extração.

### **Medidas gerais de prevenção, correção e mitigação de impactos negativos na pedreira.**

Depois de identificadas as ações que contribuem para a existência de impactos negativos e analisados os factores ambientais que são impactados, é necessário estabelecer medidas correctivas para que os efeitos sejam mínimos ou não controlados. "A atenuação tem a finalidade de reduzir a magnitude, intensidade ou duração dos impactos ou de devolver o ambiente à sua qualidade original ou restaurar suas propriedades básicas. Dentro das medidas de mitigação, uma e muito importante é a monitorização do cumprimento das leis, regras, regulamentos e principais órgãos legais.

As atenuações têm a ver com a correção, mitigação ou compensação de impactos negativos significativos. Portanto, mitigação e correção estariam relacionadas a evitar, diminuir ou restaurar impactos. A fim de estabelecer medidas preventivas, correctivas e de mitigação, teve-se em conta a Vadillo (1994).

### **CONCLUSÕES**

1. A avaliação ambiental da pedreira de mármore, permitiu identificar, caracterizar e avaliar os impactos produzidos, com um alto nível de geração de impactos negativos sobre os componentes ambientais.
2. Foram identificados 21 impactos, dos quais apenas quatro são de natureza positiva (Geração de fontes de emprego, Serviços públicos, Estradas de acesso e Finanças do Estado). O resto é de natureza negativa, representando 81%.
3. O impacto negativo classificado como severo atinge um valor de 57: a modificação da paisagem. É um impacto de considerável magnitude e de grande

importância devido aos efeitos que produz no ambiente e o muito benéfico é dado pela melhoria das estradas de acesso e pelo aumento das Finanças do Estado.

4. Factores ambientais recebem altos impactos negativos; atmosfera, flora e fauna, água, solo e paisagem. As actividades do projecto que geram impactos negativos são: a preparação da terra e a extracção da rocha.
5. As medidas preventivas, correctivas e mitigadoras reflectidas no estudo, satisfazem as necessidades que os problemas ambientais demandam gerados pela extracção de mármore na pedreira e sua eficiência dependerá de sua correta implementação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abirochas, C. (2005) Rochas Ornamentais no Século XXI. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, II Seminário de Rochas Ornamentais do nordeste Museu Geológico da Bahia salvador. Disponível na em <http://abirochas.com.br/br/index.html>. Acesso em 25 de ago. de 2017.

Acevedo M. (2002) Critérios para avaliação de estudos ambientais e para o monitoramento ambiental de projetos. Ministério do Meio Ambiente da República da Colômbia, Acordo Andrés Bello.

Boori, Mukesh. (2011). Avaliação de impacto ambiental e gestão dos recursos naturais no estuário Apodi Mossoró, nordeste do Brasil. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 188pp.

Carcedo, F. J. & Fernández, L. V. (1989). Manual de restauração de terras e avaliação de impactos ambientais em mineração. ITGE/MTE. Madrid, pp.321

Chiodi, F. (1995) Aspectos Técnicos e Econômicos do Setor de Rochas Ornamentais. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral. CNPq, CETEM.

Conesa, V. (1997). Guia metodológica de avaliação de impacto ambiental 2ª edição Madrid Editorial Madrid Press. Madrid. 1997. 3ª edição. Referência de biblioteca de filosofia: FL/ TD 194.6. C66. 108p.

Cruz A. (2006). Estudo de viabilidade da exploração da pedreira Caimital no município de Turbaco (Bolívar). Especialização em gestão de avaliação de projetos de engenharia. Universidade de La Salle. Bogotá Colômbia.

Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). Avaliação dos impactos ambientais de projetos de construção. Revista de engenharia de construção, 29(3), 234-254. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>

Espinosa, G. (2002). Gestão e Fundamentos da Avaliação de Impacto Ambiental. 255p.

Francisco W. (2017). Os problemas gerados pela mineração. Brasil Escola. Disponível em <http://www.brasilecola.com/geografia/os-problemas-gerados-pela-mineracao.html>. Acesso em 25 de novembro de 2017.

Gallardo, M., Cabrera, D., Bruguera A., & Madrazo, E. (2013) Avaliação dos impactos ambientais causados pela actividade de mineração na cidade de Santa Lucía, Pinar del Rfo. Revista Avances Vol. 15 (1). 1-16pp.

Gómez, I. (2016). Proposta metodológica para a avaliação do impacto ambiental na mineração a céu aberto "Cantera Begoña". Tese de licenciatura em Ciências Ambientais. Faculdade de Ciências Experimentais, Departamento de Bioquímica e Ambiente, Área de Engenharia Química.

Hernández, J. Ulloa, C. y Rosario, F. (2011) Impacto ambiental da exploração do depósito de materiais de construção El Cacao. Mineração e Geologia, 27 (1), p. 38-53.

Khabali, H., Targuisti, E. y Khalifi, K. (2013). Exploração de pedreiras na costa de Kenitra e sua área de influência: estudo de impacto ambiental. Revista de Estudos Andaluces, 30, 1-26.

Lawrence, D. (2003) Environmental Impact Assessment: Practical solutions to recurrent problems. New York: John Willey.

Leopold, L.B., Clarke, F.E. Hanshaw, B.B., y Balsley, J.R. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. Geological Survey Circular 645. U.S.D.I. Washington, D.C.

Montes de Oca, A. (2017) Procedimento para a recuperação de áreas degradadas em pedreiras de áridos. Tese doctoral. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa.

Oyarzún, J. (2008): Planes de Cierre Mineros – Curso Resumido. Universidad de La Serena.

Pinheiro, P. (1999) Estudo sobre as rochas ornamentais rochas ornamentais em Angola, Consultores Internacionais SA para o Consórcio AIDA-ICEP-AIP-AEP.

Programa de Desenvolvimento do Sector Geológico-Mineiro da Província do Namibe, Governo Provincial do Namibe, (2014).

República de Angola. (1998) Bases do Ambiente de Angola. Lei n.º 5/98:

República de Angola. (2011) Código Mineiro Lei n. 31.

Romacheli, R. (2009) Avaliação de impactos ambientais: potencialidades e fragilidades. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade de Brasília, Brasília, 96 pp.

Soriano, P., Ruiz, R., y Ruiz, L. (2015). Critérios de avaliação do impacto ambiental no setor de mineração. Revista da Faculdade de Engenharia Industrial. 18(2): 99-112.

# IMPLICACIONES SOCIO-ANTROPOLÓGICAS DERIVADAS DE LOS DESASTRES NATURALES. CASO VALLE DEL MOCOTIES-TOVAR-VENEZUELA

Jesús, A. Morales

*Departamento de Psicología y Orientación, Universidad de Los Andes, Venezuela.*

*e-mail: [lectoescrituraula@gmail.com](mailto:lectoescrituraula@gmail.com)*

## RESUMEN

*La alteración de los espacios naturales como resultado de la intervención humana irracional, ha provocado daños irreversibles que amenazan la vida en nuestro planeta. Esta vulneración ha traído como consecuencia la modificación significativa de las condiciones climatológicas, alteración de los ecosistemas y el uso indebido de escenarios no aptos para ocupación humana, factores que dan cuenta de la ineficacia institucional y de la evidente permisividad normativa, aspectos a los que se les atribuye la ubicación de asentamientos humanos y la concentración poblacional excesiva en zonas en condición de riesgo; en tal sentido, la presente disertación procura un acercamiento socio-antropológico a las implicaciones derivadas del desastre natural acaecido en el mes de agosto del presente año, en el municipio Tovar del estado Mérida-Venezuela. Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el método etnográfico, pues se realizaron conversaciones y diálogos informales con sujetos que vivenciaron cercanamente este fenómeno natural denominado vaguada, sucedido también en el año 2005. Como técnica se utilizó el análisis del discurso, con el propósito de interpretar las representaciones que los sujetos precisaban sobre este desastre natural. Los resultados indican lo siguiente: los desastres naturales constituyen respuestas frente al inapropiado proceder humano; estos fenómenos configuran las condiciones para la manifestación de comportamientos humanos irracionales que tienden a agravar los efectos del desastre padecido; el altruismo, la empatía y la solidaridad emergen como parte de las relaciones de apoyo y ayuda, aspectos que coadyuvan a sobrellevar el impacto psico-social de los individuos afectados. En conclusión: es preciso resaltar que el evidente deterioro institucional venezolano constituye un aspecto determinante del cual se desprende la incapacidad para ofrecer acciones de intervención preventiva y la atención estratégica necesaria para minimizar los factores de riesgo, mediante la aplicación de propuestas que respondan a las exigencias propias del ordenamiento y planificación territorial.*

*Palabras Clave:* Desastres Naturales, Implicaciones Socio-Antropológicas, Deterioro Ambiental, Factores de Riesgo, Mérida-Venezuela.

## INTRODUCCIÓN

El Valle del Mocoties como se le denomina a la agrupación de cuatro de los municipios del estado Bolivariano de Mérida (Tovar, Santa Cruz, Zea y Bailadores) históricamente ha padecido de diversos desastres naturales que han provocado tanto pérdidas humanas significativas como daños materiales cuantiosos. Los pronunciamientos institucionales

han arrojado que este espacio geográfico por sus características de ubicación en medio de un valle bordeado por el Río Mocotíes y por varias quebradas provenientes de los páramos cercanos, entre los que se precisa el del municipio Guaraque aunado al escaso mantenimiento preventivo de rigor, se han posicionado en las principales causales de los recurrentes desastres ocasionados durante las últimas décadas.

Comprender estos fenómenos se ha convertido en un complejo desafío para las ciencias sociales y, en específico para disciplinas como la socio-antropología, a la que se le atribuye entre otros propósitos el entendimiento de las respuestas, reacciones y comportamientos que los sujetos adoptan frente a situaciones críticas y caóticas suscitadas en su contexto de convivencia. Parafraseando a Oliver-Smith (1995), este acercamiento comprensivo a los desastres naturales no solo se enfoca en dar cuenta de las dimensiones socio-histórica, estructurales y culturales, sino la investigación del estrés ambiental, las amenazas de los desastres y los procesos socio-políticos que dan lugar a la configuración de una organización social particular, como resultado de la reacción de la naturaleza al proceder irracional del ser humano.

Por ende, dar cuenta del impacto social que se genera sobre determinado espacio geográfico afectado por un desastre natural, supone valorar el carácter vulnerable, los daños sufridos y la reacción de los grupos humanos, pero además, precisar cómo la actuación política e institucional, la organización social y las actitudes tanto ideológicas como culturales que los sujetos adoptan, construyen y representan como resultado del impacto de vivencias directas, de las cuales se derivan significados que refieren a la auto-atribución de co-responsabilidad que los involucrados directos le dan a su actuación sobre espacios geomorfológicos y ambientales vulnerables.

Una revisión del informe Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de los Estados Americanos (1991), deja ver que el impacto de los fenómenos naturales en la conducta humana, ha ocasionado no solo procesos psicosociales traumáticos y estragos en ocasiones irreversibles, sino también la predisposición de la sociedad para responder a las fuerzas incontrolables de la naturaleza, ocasionando que la participación humana irracional se haya incrementado en algunos escenarios, condición que ha representado no solo el redimensionamiento de la capacidad operativa sino la sensibilización ambiental necesaria para reducir el impacto de fenómenos naturales potencialmente peligrosos.

En atención a lo planteado, este artículo de investigación reporta las implicaciones socio-antropológicas derivadas del desastre natural acaecido en el Valle del Mocotíes municipio Tovar del estado Bolivariano de Mérida.

## **MARCO TEÓRICO**

Este apartado procura un acercamiento breve a la definición tanto de los desastres naturales como del comportamiento colectivo presente en medio de situaciones críticas suscitadas en espacios naturales. Una revisión de los planteamientos realizados por Fernández, Beristain y Paéz (s.f) deja ver que los desastres naturales constituyen fenómenos cuyo impacto multidimensional provoca al menos dos situaciones que coadyuvan a complejizar las condiciones de atención institucional, a decir: desorganización social y pérdidas humanas. Como consecuencia, la ruptura de la supuesta normalidad constituye el detonante de procesos disruptivos y de conductas colectivas que coadyuvan a redimensionar el estado de caos, incertidumbre y vulnerabilidad de los afectados.



Al respecto, Cardona et al (1993) proponen que los desastres naturales refieren a “cualquier expresión que adopta la naturaleza como resultado del funcionamiento interno, estos pueden ser previsible o imprevisible dependiendo del grado de conocimiento que los hombres tengan acerca del funcionamiento de la naturaleza” (p.7). Algunas manifestaciones frecuentes asociadas con los desastres naturales que generan un elevado impacto psicosocial, las componen: inundaciones, tormentas, muertes masivas, destrucción de viviendas y espacios residenciales construidos en zonas riesgosas o cercanas a ríos-quebradas.

En este sentido, la exposición del sujeto frente a casos de emergencia derivados de los desastres naturales, producen actuaciones de diversa índole que van desde el verdadero pánico, conductas desordenadas, cuadros de ansiedad, confusión, paralización y desconcierto. Este cúmulo de reacciones psicológicas no es más que el resultado de la exposición a un episodio crítico que produce en el sistema nervioso central la excitación emocional y biológica extrema, a la cual se le atribuye la escasa adaptación y tolerancia a la frustración.

Para la antropología de los desastres, tratar de comprender estos fenómenos naturales demanda la revisión de los procesos evolutivos y el funcionamiento de la sociedad frente a situaciones acaecidas, cuyo impacto cultural determina la forma particular como los sujetos se organizan para sobrellevar sus implicaciones (Oliver-Smith, 1995). Por su parte el Informe Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de los Estados Americanos (1991) propone que los desastres naturales son “eventos físicos y peligrosos, en los que la participación humana se ha convertido en el elemento causal de fatalidades y/o daños más allá de la capacidad de la sociedad para responder (p.25).

Según Narváez, Lavell y Pérez (2009), los desastres naturales constituyen eventos de impacto multidimensional que no solo alteran la cotidianidad, sino que generan afectaciones a nivel de salud, social, psicológico y emocional, vulnerando la capacidad de respuesta de los grupos humanos. Por ende, como factores de riesgo tienden a intensificar el comportamiento de los afectados directa o indirectamente, ocasionando que emerjan actuaciones tanto positivas como negativas que determinan el funcionamiento normal de la sociedad. Por lo general, ante un desastre natural la sociedad se ve condicionada a desplegar un sinnúmero de conductas asociadas con la sobrevivencia, que motivan el proceder irracional, destructivo y dañino que deja a un lado toda posibilidad altruista y empática de atender a las necesidades de terceros.

Lo planteado supone, que los eventos naturales constituyen oportunidades para que sujetos con bajo nivel pro-social aprovechen para perpetrar actos delictivos, como resultado del estado de caos y del “bajo nivel de organización y cohesión interna de las comunidades, condición que impide su capacidad para prevenir, mitigar y responder a las secuelas del desastre” (Cardona et al, 1993, p. 121).

Desde la perspectiva de la CEPAL (2014), los desastres son “consecuencia de fenómenos naturales desencadenantes de procesos que provocan daños físicos y pérdidas humanas y de capital, al tiempo que alteran la vida en las comunidades y personas, y la actividad económica de los territorios afectados” (p.17). Este cúmulo de afectaciones constituye diversas dimensiones desde las cuales los desastres naturales logran vulnerar la estabilidad de determinado espacio geográfico, generando letargo en las actividades sociales y económicas, pero además, poniendo a prueba la capacidad institucional y la flexibilidad de los afectados para impulsar procesos de reconstrucción de los escenarios alterados.

Para Alarcón et al (2005) los desastres como procesos que derivan en estados de emergencia ocasionan en los espacios afectados un estrés colectivo que agudiza el impacto psicosocial de los sujetos, quienes al valorar la ruptura de las estructuras sociales entran en un estado de “desequilibrio físico, psicológico, social y económico que unido a la alteración del ambiente del individuo o grupo, agudizan la crisis, la sensación de caos y la incertidumbre” (p.21). Es escenarios vulnerables estas reacciones psicológicas configuran las condiciones para no alcanzar actuaciones resilientes, pero, además, imposibilitan la reducción de los niveles de tensión social dejando a un lado toda oportunidad para lograr condiciones óptimas de seguridad.

## **MÉTODOS**

Este apartado describe los procedimientos metodológicos seguidos en el proceso de investigación. En primera instancia es preciso indicar que la investigación se inscribe en el enfoque cualitativo, específicamente en el método etnográfico; el cual según propone Guber (2001) consiste en la inserción prolongada en un determinado contexto, en que se generan procesos interactivos entre los sujetos de determinado grupo social y el investigador; con ello se busca deducir “los significados que los sujetos le asignan a sus prácticas, a sus modos de vida y a la cotidianidad” (p.16). Interpretando a la autora, hacer etnografía consiste en fusionarse con el grupo social con el propósito de acercarse a la manera como los sujetos comprenden la realidad, pero además, y desde el mismo contexto obtener información y los sentidos atribuido a las vivencias, experiencias y representaciones sociales (Angrosino, 2012; Corbetta, 2007; Martínez, 2009; Restrepo, 2016).

Con respecto a los encuentros etnográficos, es preciso indicar que se realizaron dos veces por semana, utilizando para recoger información los diálogos informales y las conversaciones abiertas, con el propósito de motivar la descripción, narración y expresión de ideas en torno al desastre natural acaecido el 23 de agosto del 2021. Estos encuentros fueron acompañados con entrevistas abiertas cuyo registro se realizó luego de cada encuentro, a los fines de ir sistematizando los aportes de los sujetos. Como técnica el procesamiento de información se utilizó el análisis del discurso, con la finalidad de entender relaciones subyacentes y significados-sentidos, a partir de los cuales construir una interpretación que diera cuenta del contexto, de los procesos psicológicos, sociales, culturales, políticos, ambientales e ideológicos en torno a los desastres naturales (Dooley y Levinsohn, 2007; Santander, 2011; Taylor y Bogdan, 2002).

Cabe destacar que de la información suministrada por los sujetos (12), se tomaron fragmentos intencionalmente, en los cuales se evidenciaba opiniones personales, afirmaciones relacionadas con representaciones sociales y respuestas contentivas de significados alusivos al desastre natural acaecido en el Valle del Mocotíes. Algunos de los elementos identificados de este proceso de investigación etnográfica se mencionan a continuación: el proceder institucional deficitario como resultado de un Estado fallido; los desastres naturales constituyen respuestas frente al inapropiado proceder humano; estos fenómenos configuran las condiciones para la manifestación de comportamientos humanos irracionales que tienden a agravar los efectos del desastre padecido; el altruismo, la empatía y la solidaridad emergen como parte de las relaciones de apoyo y ayuda, aspectos que coadyuvan a sobrellevar el impacto psico-social de los individuos afectados; por último, una sociedad con profundos rasgos anómicos es capaz de

aprovechar la ausencia de instituciones sólidas para acometer contra los bienes de terceros y vulnerar la propiedad privada, perpetrando daños, robos y hurtos famélicos.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Algunas aproximaciones socio-antropológicas derivadas de este estudio se mencionan a continuación:

En primer lugar, la edificación de soluciones habitacionales en zonas riesgosas se ha convertido en un proceder recurrente y continuo en el municipio Tovar, esto debido, a la permisividad del gobierno local y a la flexibilización en cuanto a la aplicación de las normas de ordenamiento del territorio.

En segundo lugar, la ocupación de los espacios geográficos vulnerables unida a sus implicaciones ambientales, han ocasionado la alteración de los ecosistemas y deterioro de espacios bajo régimen de protección especial, cuyas características particulares demandan “la aceptación humana de que se está conviviendo con una naturaleza viva, que tiene sus propias leyes de funcionamiento contra las cuales no puede atentar, a riesgo de resultar el mismo dañado” (Cardona, et al, 1993).

En tercer lugar, la tala y la quema indiscriminada han ocasionado cambios climatológicos, la erosión de los suelos y la exposición de sedimentos que no solo dan cuenta de las consecuencias del proceder humano sino de la inoperancia institucional, factor de riesgo que sustenta los cambios en el paisaje natural ocasionando la propensión a sufrir daños de mayor impacto socio-ambiental.

En cuarto lugar, parte de las consecuencias socio-antropológicas ocasionadas por el desastre natural de agosto-2021 dejaron ver el estado de precariedad institucional, es decir, la deficitaria capacidad del Estado para atender las necesidades derivadas de fenómenos sobrevenidos, lo que confirma la ausencia de políticas públicas no solo educativas sino de prevención en materia de desastres. Según el Informe Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de los Estados Americanos (1991) la inoperancia institucional en lo que respecta al mantenimiento preventivo a los afluentes de ríos, quebradas y demás espacios con sobrecarga hídrica, refieren a factores que ponen en riesgo establecimientos humanos inmediatos, causando: desbordamientos, inundaciones y la emergencia de otras amenazas geológicas/hidrológicas como avalanchas, deslizamientos y hundimiento de tierra (Goleman, 2009; Zimmermann, 2010).

En quinto lugar, las condiciones socio-económicas críticas por las que atraviesa el país provocaron la emergencia de comportamientos negativos como el saqueo famélico, vulneración a la propiedad privada y un estado de caos, que no logró ser controlado dada la ausencia de fuerzas vivas que pudieran reestablecer el orden de manera inmediata. Esto refiere, entre otras cosas, a la actuación institucional ineficiente producto de un Estado fallido, con escaso potencial para coordinar relaciones de apoyo que favorecieran la imposición del orden y el control, como acciones inmediatas para reducir las conductas riesgosas que atenten contra el bienestar.

En sexto lugar, el resultado de un estado de desgobierno ocasionó episodios de anarquía en el que los comportamientos anómicos afloraron, provocando que sujetos que no sufrieron daños se trasladaran al lugar afectado para sustraer bienes y propiedades de viviendas, lugares de producción de alimentos y de comercios; esto como resultado de la escasa seguridad, resguardo y vigilancia institucional. Esto generó la emergencia de conductas y emociones colectivas como episodios de tensión, inestabilidad

socioemocional, sensación de peligro e inseguridad, así como el miedo producto del estado de alerta y pánico que permea el ambiente social.

Lo anterior refiere a resultados de la vulnerabilidad política e institucional, como factor de riesgo que imposibilitan la toma de decisiones y la organización gubernamental efectiva, como condiciones de las que depende el proceder del Estado con apego a lo normativamente establecido, de lo cual depende la adecuación de acciones a los planes de ordenamiento del territorio (Cardona, et al, 1993). Esto además, obliga la referencia a la vulnerabilidad técnica que permea los sistemas de planificación territorial de la que se deriva la manipulación de estudios de impacto ambiental y el otorgamiento de permisos para la construcción en zonas de riesgo.

En séptimo lugar, parte de los comportamientos positivos vivenciados fueron: la integración de esfuerzos y el establecimiento de relaciones cooperación entre sujetos del municipio, que junto a las redes de apoyo movilizadas internacionalmente (UNICEF), coadyuvaron con la atención efectiva a los sujetos afectados, a quienes se les ofreció atención médica preventiva, alimentación, asesoramiento psicosocial y el inmediato desalojo de los espacios afectados. Este proceder altruista y empático debe comprenderse como una respuesta positiva, que no solo dan cuenta del sentido de co-responsabilidad y sensibilidad humana, sino del compromiso que lleva al sujeto a adoptar acciones heroicas, planificadas y coordinadas en pro de brindar ayuda a los afectados (Fernández, Beristain y Paéz, s.f).

Es preciso indicar, que la organización comunitaria y la unificación de esfuerzos locales propiciaron las condiciones para cumplir con propósitos importantes tales como: la identificación de los sujetos afectados, la determinación de los impactos ocasionados, la cuantificación de pérdidas humanas, la canalización de ayudas en lo que a atención médica, alimentos y enseres; pero además, el seguimiento y la reubicación en hogares solidarios a gran parte de los sujetos que quedaron en estado de desamparo total. Esto refiere a la capacidad de autogestión, como proceso social que garantizó la atención digna y el acercamiento posterior de los organismos de seguridad-socorro.

En suma, es perentorio hacer alusión a la auto-atribución de responsabilidad que los sujetos afectados le hacen a sus acciones, a las cuales interpretan como parte de los elementos causales que desencadenaron el proceder devastador de la naturaleza; esto a su vez deja ver las consecuencias derivadas de la tala indiscriminada hacia las zonas altas (montañas), el cambio de uso de áreas bajo régimen de protección especial, el vertedero de basura, residuos de aceites y materiales químicos en ríos-quebradas, la permisividad institucional y el tráfico de influencias, como factores de riesgo que han impulsado el actuar indolente e irracional de los ocupantes de tierras del Estado. Del mismo modo, se apreció la necesidad de promover el sentido de co-responsabilidad con el resguardo de los espacios cuya riqueza hídrica demandan un trato especial, que garantice la integridad del vital líquido así como de la vegetación del lugar.

## **CONCLUSIONES**

Los desastres naturales constituyen fenómenos que provocan multiplicidad de reacciones en las agrupaciones humanas que los padecen. Para algunos sujetos constituye el punto de reflexión sobre las implicaciones del proceder irracional e inconsciente sobre el medio ambiente; ocasionando que las fuerzas de la naturaleza alcancen considerable magnitud. Mientras que para otros las consecuencias de la deficitaria actividad preventiva y educativa, se erigen como variables que determinan las relaciones del ser humano con los sistemas ecológicos, y a las que además, se les

atribuye mayor preponderancia por redimensionar la vulnerabilidad que impulsan las potenciales pérdidas tanto humanas como de recursos económicos (bienes).

Con la vaguada del 23 de agosto del 2021, el municipio Tovar sufrió daños significativos tanto en las zonas urbanas como en los espacios rurales; la magnitud de este desastre natural dejó ver la actuación ineficiente del aparato institucional, específicamente en lo relacionado a su capacidad de respuesta para atender las necesidades inmediatas de la población afectada. La depresión socioeconómica por la que atraviesa Venezuela, motivó la ausencia de mecanismos, dispositivos y procedimientos de reacción inmediata, que le permitieran al Estado acceder a los espacios afectados; sin embargo, la actuación institucional de organismos internacional posibilitó la extensión de ayuda humanitaria en áreas importantes como: insumos médicos, campañas de vacunación, suministro de alimentos, bienes y enceres a las familias afectadas, esto como resultado de la cooperación de las fuerzas vivas y de la población civil.

Si bien es cierto, este desastre natural provocó el afloramiento de comportamientos positivos en la población en general, en la cual se dejó ver el operar en atención a valores como: altruismo, solidaridad, empatía, entre otros, también se precisaron actuaciones anómicas como: hurto famélico y recurrentes robos tanto de bienes y pertenencias de las personas afectadas cuyas viviendas quedaron expuestas; este proceder se debió a la ausencia de fueras de seguridad, condición que fue aprovechada por sujetos tanto del lugar como de espacios aledaños, quienes aprovechando la vulnerabilidad del lugar, procedieron de modo delictivo.

Es preciso indicar, que frente a la actuación deficitaria del aparato institucional se apreció la emergencia de iniciativas de otras formas de organización social (fundaciones, asociaciones, entre otras), así como de figuras de liderazgo comunitario que facilitaron la gestión de soluciones a las situaciones meritorias de atención inmediata. De allí que, los desastres naturales puedan entenderse como eventos de elevado impacto psicosocial que ocasionan episodios de estrés colectivo, que revivan en la desestabilización emocional y la reducción de la capacidad de los afectados para afrontar sus implicaciones multidimensionales.

En razón de lo planteado, se reitera la necesidad de generar procesos educativo-formativo en las siguientes direcciones: acercar a la ciudadanía a los mecanismos de rescate y de reacción inmediata, que permitan a las comunidades atención oportuna y efectiva, a través de la cual no solo prevenir sino intervenir con mayor celeridad, garantizando que los afectados logren sobreponerse con mayor rapidez a las secuelas de los desastres naturales; integrar a la población en general tanto en campañas de conservación y preservación como en procesos sensibilización que desarrollen la inteligencia ecológica, como la capacidad de la que depende el fortalecimiento del compromiso con el medio ambiente así como del sentido de pertenencia con el resguardo de los reservorios ecológicos que existen en el contexto de convivencia inmediata.

En síntesis, reducir las actuaciones irracionales y opuestas a la sustentabilidad requiere la transformación de los estilos de vida, de las prácticas de producción y consumo, así como los modos como se vienen utilizando los recursos naturales que nos provee el escenario inmediato en el que se hace vida; esto demanda la promoción de la inteligencia ecológica, como la capacidad para estrechar lazos de cooperación y redes de apoyo institucional que impulsen el resguardo del medio ambiente así como del

equilibrio de los ecosistemas, garantizando de este modo la adopción de actitudes y comportamientos que coadyuven en la preservación de la vida en el planeta.

## REFERENCIAS

- Alarcón., et al .Intervención psicológica ante situaciones de emergencias y desastres. Patronato Provincial de Servicios Sociales de Córdoba. (2005).
- Angrosino, M. Etnografía y observación participante en investigación cualitativa. Madrid: Ediciones Morata. (2012).
- Cardona, et al. Los desastres no son naturales. *Revista Semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*. Pp. 1-137. (1993).
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Manual para la evaluación de desastres. Santiago de Chile. Organización de Naciones Unidas. (2014).
- Corbetta, P. *Metodología y técnicas de investigación social*. España: Editorial McGRAW-HILL. (2007).
- Dooley, R y Levinsohn, S. *Análisis del discurso. Manual de conceptos básicos*. Instituto Lingüístico de Verano. (2007).
- Fernández, I., Beristain, C y Paéz, D. Emociones y conductas colectivas en las catástrofes: ansiedad, rumor, miedo y conductas de pánico. Disponible
- Goleman, D. *Inteligencia ecológica*. Ciudad De México: Ediciones B.S.A de C.V. (2009).
- Guber, R. *La etnografía: métodos, campo y reflexividad*. Buenos Aires: Editorial Norma. (2001).
- Martínez, M. *Comportamiento humano*. México: Editorial Trillas. (1999).
- Organización de Estados Americanos. Informe del Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de los Estados Americanos. Desastres, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños. Washington, D.C. (1991).
- Oliver-Smith, A. Perspectivas antropológicas en la investigación de desastres. *Revista Semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Desastres-Sociedad*, No.5 / Año 3, pp. 1-31. (1995).
- Restrepo, E. *Etnografía: alcances, técnicas y éticas*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. (2016).
- Santander, P. Por qué y cómo hacer Análisis de Discurso. *Cinta moebio* 41, pp. 207-224. (2011).
- Taylor, S,J y Bogdan, R. *Introducción a métodos cualitativos de investigación*. México: Paidós. (2002).
- Zimmermann, M. *Psicología ambiental, calidad de vida y desarrollo sostenible*. Bogotá: Ecoe Ediciones. (2010).

# PSICOLOGÍA AMBIENTAL. APORTACIONES, ESTRATEGIAS Y PROPÓSITOS ASOCIADOS CON LA ADOPCIÓN DE COMPORTAMIENTOS ECOLÓGICOS

Jesús, A. Morales

*Departamento de Psicología y Orientación, Universidad de Los Andes, Venezuela.*

*e-mail: [lectoescrituraula@gmail.com](mailto:lectoescrituraula@gmail.com)*

## RESUMEN

*Promover la interacción consciente, sostenible y medida con el medio ambiente corresponde a un objetivo generalizado de casi todos los programas educativos globales en materia de protección y preservación de la naturaleza, en los que se logra apreciar como aspecto transversal, la formación comprometida del ser humano como agente capaz de lograr el aprovechamiento equilibrado de los recursos que le provee su entorno, en un intento por garantizar su permanencia en el tiempo, así como el disfrute de las generaciones futuras. En tal sentido, esta investigación documental reporta las aportaciones de la psicología ambiental, como una disciplina que, si bien es cierto tiene larga data, ha sido tratada a menor escala que la eco-pedagogía y otras tantas, que buscan la transformación de las prácticas humanas que por su potencial destructivo pudieran generar problemas ambientales inmediatos y en el futuro. Esta disciplina asume que la protección del medio ambiente debe partir de la integración de las dimensiones: social, económica, cultural y política y educativa, en un intento por reconciliar al ser humano con su entorno, con el uso racional de los recursos naturales y el respeto a la diversidad biológica; parte de sus cometidos están asociados con la construcción de nexos de identidad y sentido de pertenencia sobre los reservorios de vida que aportan al equilibrio de los ecosistemas y al sostenimiento de condiciones supervivencia de las que depende el bienestar de la humanidad. Lograr estos cometidos supone entonces, el desarrollo de estrategias como: sensibilización sobre los problemas ambientales coyunturales-globales-locales, transmisión de valores pro-ambientales y el empleo de principios éticos y ecológicos. En conclusión, la psicología ambiental constituye una poderosa disciplina en función de la cual fomentar la responsabilidad ambiental tanto individual como colectiva sobre los riesgos ecológicos, físicos y sociales, propiciando comportamientos que preserven los bienes comunes.*

*Palabras Clave:* Psicología ambiental, comportamientos ecológicos, bienestar, preservación, ecosistemas.

## INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra atraviesa en la actualidad una de las mayores crisis, que por sus particularidades amenaza con la vida y el bienestar de millones de especies; por ende, fomentar el crecimiento de la conciencia ambiental como resultado del desarrollo de la inteligencia ecológica, se ha consolidado como uno de los prominentes desafíos gubernamentales y educativos; una aproximación al estado actual de la situación, la caracteriza Sachs (2015) al afirmar que “la humanidad está cambiando el clima del planeta, la disponibilidad de agua dulce, la química de los océanos y los hábitats de las

especies; de allí que se experimenten alteraciones incuestionables en algunos procesos de la vida” (p.19).

En este sentido, la psicología ambiental como disciplina encargada de la creación de condiciones apropiadas para el desarrollo de la vida, tiene como cometidos generar “formas emergentes de intervención de la naturaleza, así como nuevas manifestaciones de sus impactos y riesgos ecológicos; esto supone un giro en la práctica y en los discursos sobre la biodiversidad y el desarrollo sostenible-sustentable (Leff, 2004, p.115). Entender estos planteamientos requiere del concierto de una serie de condiciones, en las que el ser humano se asuma como un subsistema del que depende significativamente el funcionamiento de los sistemas ecológicos, es decir, se trata de integrarlo en una especie de relación empática y sinérgica de cooperación que ayude en la tarea de enfrentar las acciones irracionales mediante la ruptura de estilos y patrones históricos, a los que se le atribuye la responsabilidad del desequilibrio que experimenta el planeta en la actualidad.

Más adelante, Leff (2006) plantea que redimensionar la racionalidad del ser humano, refiere a la disposición para cuestionar las acciones presentes, sin profundizar exclusivamente en el pasado, pero si tomando como referente las consecuencias de la escasa inteligencia ecológica, capacidad a la que se le atribuye la imposibilidad de reducir los factores de riesgo que por sus implicaciones, han derivado en el uso inapropiado de la naturaleza motivando la preocupación por “otorgarle sustentabilidad a la vida, mediante la creación de condiciones estratégicas y contextualizadas, cuyo impacto articule la relación sociedad-sistemas ecológicos” (p.7).

Lo expuesto refiere a dos procesos plenamente diferenciados: la reconstrucción y la reapropiación; el primero alude a la transformación de patrones de comportamiento enraizados en las prácticas culturales, en las que predomina la racionalidad insustentable y cuyas implicaciones han traído como consecuencia la transgresión de los límites del actuar humano ocasionando la muerte entrópica del planeta. En tal sentido, la psicología ambiental procura estrechar puentes de reconciliación ser humano-naturaleza, como punto de partida para lograr propósitos como: la potenciación de la consciencia, el sentido de apertura y disposición para sustituir formas de vida insostenibles por patrones ecológicamente sustentables, y comprender desde la co-responsabilidad la compleja organización ecosistémica de la naturaleza, generando de esta manera procesos sinérgicos que reduzcan la degradación de los modos de vida.

Por su parte, la reapropiación refiere a la capacidad para gestionar coherentemente los recursos naturales no renovables, partiendo de la interiorización de valores ecológicos que forjen la reconstitución del sentido de pertenencia y de las identidades personales, colectivas y culturales, que impulsen experiencias sustentables fundadas en una nueva racionalidad alternativa, en la que se reduzcan los riesgos y costos ecológicos así como situaciones de caos e incertidumbre que comprometan la calidad de vida y el bienestar de las próximas generaciones. En razón de lo planteado, este ensayo reporta las aportaciones de la psicología ambiental, como una disciplina que, si bien es cierto tiene larga data, ha sido tratada a menor escala que la eco-pedagogía y otras tantas, que buscan la transformación de las prácticas humanas que por su potencial destructivo pudieran generar problemas ambientales inmediatos y en el futuro.

## **PSICOLOGÍA AMBIENTAL: CONCEPTOS Y APORTACIONES**

Este apartado procura la conceptualización de la psicología ambiental, dejando ver su pertinencia y relevancia en el proceso de fomentar la adopción de comportamientos



ecológicos, que le permitan al ser humano cambiar su proceder hacia modos de comprensión en términos de resguardar el patrimonio natural para las futuras generaciones, anticipando posibles factores de riesgo tanto ambientales como ecológicos que pudieran agudizar el desequilibrio que aqueja al planeta. Esto significa, construir experiencias individuales y colectivas que optimicen las interacciones continuas hasta transformar los estilos de vida y las actividades no sustentables en comportamientos conscientes y comprometidos con la preservación de las condiciones necesarias para el desenvolvimiento de la vida.

Una interpretación de los aportes de Holahan (2000) sobre la psicología ambiental, la dejan ver como la encargada de la construcción de espacios idóneos y positivos, en los que el ser humano logre niveles positivos de estabilidad y equilibrio emocional, psicológico y social; todo ello como resultado de la interacción consciente con el mundo natural, como el espacio que favorece la vitalidad socio-psicológica responsable del desempeño coherente de la conducta del individuo. Por ende, la psicología ambiental se ocupa de las transacciones entre el individuo y su entorno (natural), ofreciendo las orientaciones necesarias para garantizar el uso coherente, planificado y ordenado que proporcione mayores condiciones de bienestar.

Para Rojas (s.f) la psicología ambiental puede asumirse como una disciplina que procura la organización de las actividades económicas y el manejo de procesos sostenibles a través de los cuales lograr que el ser humano aprenda a convivir con los sistemas ecológicos; esto implica desde la teoría cognitiva la promoción del pensamiento crítico-reflexivo que le ayude al sujeto en la tarea de adoptar nuevos esquemas racionales y ecológicos de interacción con el medio ambiente. Este énfasis en la interacción humana-sistema ecológico tiene como vértice la mitigación de los factores que amenazan la supervivencia biológica, social y psicológica de la especie humana; esto significa la transformación de los modos de vida nocivos por el disfrute sostenible de los recursos que provee el medio ambiente.

Desde la perspectiva de Goleman (2009) la psicología ambiental cumple un papel fundamental en la potenciación de la vida humana, al promover tanto la inteligencia ecológica como las capacidades para estrechar nexos entre el individuo y la naturaleza, adoptando el sentido de co-responsabilidad y de reciprocidad, como valores humanos de los que depende la emergencia de beneficios mutuos asociados con la cooperación en lo que preservación de los sistemas ecológicos se refiere.

Según Zimmermann (2010) la psicología ambiental es una disciplina que procura comprender las relaciones de reciprocidad que se dan entre el individuo y el medio ambiente; de allí, que su objeto sea la promoción de nuevas actitudes y comportamientos, que reflejen la vinculación positiva entre el ser humano y “la problemática socio-ambiental, lo que significa un cambio de visión psicológica del mundo; enfocada en generar procesos adaptativos que modifiquen estilos de vida irracionales por hábitos ecológicos” (Zimmermann, 2010, p.14). Esta posición alude a la reconciliación entre los sistemas ecológicos y el ser humano, lo cual implica el desarrollo de una conciencia ambiental que impulse prácticas conservacionistas que al ser integradas a la dimensión cognitiva del sujeto coadyuven con el mantenimiento del equilibrio de la vida en el planeta.

Por su parte Avendaño, Galindo y Angulo (2012), proponen una definición operativa de la psicología ambiental, asumiéndola como una disciplina encargada de “aumentar las posibilidades de elevar nuestra calidad de vida por la vía de desarrollar acciones efectivas para enfrentar una amplia gama de problemas ambientales que nos permitirán

desarrollar y formar personas con conciencia ecológica favor del medio ambiente” (p.8). Este aporte reitera el compromiso de la psicología ambiental con la comprensión, conservación y uso de los recursos que provee el entorno, los cuales para ser prolongados a las generaciones futuras requiere desarrollar modelos alternativos fundados en la conciencia sostenible, capaz de reducir los riesgos y potenciar el equilibrio ambiental necesario para mantener el funcionamiento de los sistemas ecológicos.

Según Sachs (2015), la psicología ambiental tiene como finalidad promover la protección de las zonas vulnerables, pero además, impulsar que “el medio ambiente esté protegido frente a las degradaciones inducidas por el hombre; de allí la persistencia en adoptar el desarrollo sostenible, el cual desde su enfoque holístico alcanzar el crecimiento económico inclusivo y ambientalmente sustentable” (p.20). Esta posición refiere a la construcción de políticas conservacionistas, capaces de hacerle frente a los embates de una actuación histórica irracional, como resultado la superposición de la dimensión económica sobre la ecológica-ambiental, ocasionando que los ecosistemas se reduzcan a tal punto de imposibilitar que las generaciones futuras tengan acceso a condiciones de bienestar dignas y saludables.

Para Morton (2018) la psicología ambiental busca el emplazamiento humano hacia el reflexionar permanente y la conectividad espontánea entre el individuo y sistema ecológico, garantizando de este modo el redimensionamiento de las implicaciones del calentamiento global, mediante la concatenación de esfuerzos en torno a la defensa de todas las formas de vida, elevando la conciencia sobre “los peligros de la inestabilidad ecológica, las extinciones, el deshielo de los casques polares, la elevación del nivel del mar y las hambrunas” (p.51). Esto supone, entre otras cosas, la renovación del pensamiento ecológico como proceso a través del cual lograr una profunda interconectividad con la naturaleza y los sistemas que la componen.

Por su parte Maya (1997), plantea que comprender la trama de la vida parte de la revisión minuciosa de las leyes que rigen la naturaleza; de allí que se entienda a la psicología como la encargada de establecer puentes sinérgicos entre el ser humano y los sistemas ecológicos, acercando al primero a la reflexión de “las modificaciones introducidas por la actividad humana irracional e insostenible, a las cuales se le atribuye la crisis ambiental y los problemas emergentes asociados con el funcionamiento de los ecosistemas” (p.7).

En suma, la psicología ambiental como disciplina emergente ha evolucionado de manera significativa extendiendo su radio de acción centrado solo en la percepción, aprendizaje, cognición y desarrollo de la conciencia ecológica, hacia el fortalecimiento de rasgos inherentes al funcionamiento personal, en el que predomina la interacción con la naturaleza, con sus sistemas y procesos, en un intento por generar relaciones de interdependencia que motiven la emergencia del sentido de co-responsabilidad y el compromiso con la búsqueda permanente de condiciones de equilibrio, empatía y respeto por el resguardo de la integridad de los sistemas ecológicos; lo cual significa, el uso de la inteligencia ecológica como la capacidad inherente a la psicología ambiental, de la que depende la recuperación de los vínculos armónicos entre el ser humano y el medio ambiente, con el propósito de lograr mayores niveles de sensibilización que limiten el proceder irracional y redimensionen la convivencia consciente con el mundo natural.

## ESTRATEGIAS DE LA PSICOLOGÍA AMBIENTAL

Este apartado propone algunas de las estrategias que desde la psicología ambiental pudieran contribuir con el desarrollo de comportamientos co-responsables con la protección de los sistemas ecológicos del planeta; de allí, que se entiendan como mecanismos que al ser interiorizados por el ser humano, modifican sus estilos de vida, sus prácticas cotidianas y los hábitos irracionales, a los que históricamente se le atribuye la responsabilidad del deterioro sistemático del medio ambiente. Desde la perspectiva de Avendaño, Galindo y Angulo (2012), la adopción de estrategias proteccionistas de la vida en sus diversas manifestaciones, supone un cambio de actitud tanto individual como colectiva, de la cual depende la actuación de conformidad a valores como: el respeto, la conservación y la reciprocidad.

Según propone Sachs (2015), la intervención estratégica que aporta la psicología ambiental, enfoca sus esfuerzos en “la adopción de prácticas menos centradas en las necesidades intergeneracionales y más holísticas que enlacen: el desarrollo económico, la inclusión social y la sostenibilidad ambiental” (p.23). Implícitamente, esto supone el de crecimiento de la conciencia cívica como requerimiento para preservar los recursos que provee la naturaleza y, en el caso de los no renovables requieren un tratamiento especial y ético, como condicionantes de los que depende el resguardo para las siguientes generaciones.

En razón de lo expuesto, las estrategias que se proponen a continuación tienen como finalidad favorecer un cambio de las actitudes irracionales por procesos de integración individuo-entorno natural “que posibiliten la emergencia de comportamientos individuales y colectivos con respecto al mundo natural” (Zimmermann, 2013, p.15). Lo dicho supone uno un inminente desafío, consistente en ajustar la conducta humana con especial apego a principios ambientalistas que respondan a la crisis global, pero además, a las condiciones particulares de crecimiento poblacional y, por ende, de consumo, producción de insumos y demanda productos, como determinantes que exigen la modificación de comportamientos asociados con el sobreuso de energía y el manejo irracional e escasamente inteligente de la naturaleza.

Estas estrategias son:

1. Creación de brigadas ambientales. Su finalidad es establecer redes de cooperación sociedad civil, comunidad, actores sociales e institucionales que se conviertan en guardianes del equilibrio ambiental; esto significa no solo activar sino maximizar las capacidades ecológicas, que al ser operativizadas produzcan cambios en tanto en las actitudes, acciones y conductas de los individuos.
2. Formulación de inventarios tanto de problemáticas como de posibles acciones, a partir de la realización de diagnósticos comunitarios, en los que se construyan lazos de trabajo cooperativo que ayuden en el complejo proceso de reestablecer el equilibrio de los ecosistemas.
3. Construcción de campañas periódicas de reforestación, que mejoren y coadyuven en la conservación de la biodiversidad, aminorando de esta manera el problema global generado por la inminente contaminación de las aguas, suelos y aire.
4. Integración de esfuerzos sociedad-sistema educativo-aparato institucional. Esta estrategia consiste en identificar un espacio para la realización de sesiones periódicas, en las que se promuevan intercambios de experiencias positivas sobre acciones realizadas en otros contextos.

5. Crear un modelo de formación permanente con el objetivo de desarrollar procesos productivos, sanos, sustentables e inteligentes, en los que se redimensione la sensibilización, el sentido de co-responsabilidad así como el consumo orientado al uso racional y planificado.

## **PROPÓSITOS ASOCIADOS CON LA ADOPCIÓN DE COMPORTAMIENTOS ECOLÓGICOS**

El resguardo del ambiente, la búsqueda del equilibrio entre la acción humana, el aprovechamiento de los recursos no renovables y el desarrollo de la conciencia ecológica se entienden como aspectos medulares que transversalizan los programas, políticas públicas y procesos de intervención socio-ambiental; estos cometidos, igualmente compartidos por la psicología ambiental, procuran generar experiencias en las que el ser humano fortalezca el interés por “conocer los organismos y sus ecosistemas, así como redimensionar su disposición para adaptarse al entorno ecológico, en un intento por aprender sobre cómo la actividad humana interfiere en los ecosistemas, de tal manera, que hagamos el menos daño posible” (Goleman, 2009, p.51). En razón de lo expuesto, parte de los propósitos que persigue la psicología ambiental son:

1. Fomentar la sustentabilidad sugiere un cambio significativo en los hábitos de vida, en las prácticas consumistas y en adopción de aspectos ético-valorativos que conduzcan a la transformación del pensamiento irracional en comportamientos: responsables, empáticos, sensibles, auto-controlados y éticos.

2. Promover la cultura ambientalista y ecológica que adhieran el proceder humano a la “requerida conciencia y sensibilidad para actuar responsablemente con la totalidad del sistema biológico al cual pertenece” (Zimmermann, 2013, p.12).

Según Goleman (2009) al referirse al desarrollo de la inteligencia ecológica, propone que por ser una capacidad inherente al resguardo del medio ambiente, debe motivar procesos como el “descubrir y compartir la forma como funciona la relación entre nosotros y la naturaleza, para comprender el verdadero efecto que tenemos sobre ella y aprender a hacer las cosas de la mejor manera” (p.51). Esto supone el uso de conocimientos científicos a partir de los cuales construir soluciones razonables que le otorguen vitalidad a los sistemas ecológicos, pero además, aporten a la organización de acciones que resignifiquen las relaciones ser humano-ambiente, abriendo de este modo las posibilidades para fortalecer el desarrollo de la conciencia ecológica sustentada en la combinación de interdependencia, empatía y adaptación a las leyes que rigen el funcionamiento del mundo natural.

En tal sentido, la psicología ambiental tiene por objeto promover el ajuste de las acciones humanas mediante la creación de programas de sensibilización, enfocados en organizar procesos experienciales e interacciones reales, como medios a través de los cuales profundizar en las relaciones que se dan al interior de los ecosistemas, identificando las actuaciones humanas que convertidos en patrones comportamentales han ocasionado el desequilibrio ambiental, el cual por sus elevadas implicaciones han obligado al desarrollo del sentido de co-responsabilidad que conduzcan al operar producto de la relación entre actividades, ambiente físico y cogniciones (Jiménez, 2010; Jordán, 2017; Morales, 2021; Morín, 2011; UNESCO, 2015).

Según expone Sabino (2004), la psicología ambiental integra como parte de sus propósitos la estabilización de los grandes ecosistemas mediante “la superación de los efectos de la contaminación mientras se va pasando a un tipo de actividad económica

más amistosa hacia el medio ambiente, más sensata y controlada” (p.54). Esto sugiere reducir la fragilidad de los sistemas ecológicos mediante la sustitución de prácticas destructivas por comportamientos individuales y colectivos, en un intento por evitar la afectación de los delicados equilibrios, mediante el uso de procesos de “formación, sostenimiento y reproducción de la vida, no sólo de la humanidad sino de todas las formas vivientes del planeta” (Avendaño, Galindo y Angulo, 2012, p.18).

Continuando con los planteamientos de Avendaño, Galindo y Angulo (2012), algunos de los propósitos de la psicología ambiental son:

1. Promover el desarrollo de la consciencia ambiental. Consiste en ayudar a las comunidades en el proceso de adquirir tanto la sensibilidad como el compromiso para enfrentar desde la co-responsabilidad los problemas conexos.
2. Motivar la adquisición de nuevos conocimientos. Involucra el complejo desafío de enseñar el sentido crítico y la disposición para lograr “la comprensión básica del medio ambiente en su totalidad y la función humana en la búsqueda de su equilibrio” (p.28).
3. Instar el cambio de actitudes y aptitudes. Supone la adquisición de nuevos valores tanto ambientales, ecológicos y sociales, a partir de los cuales abordar los problemas medulares desde una posición preventiva y de intervención.
4. Impulsar el fortalecimiento de capacidades asociadas con la evaluación. Refiere a la formación para la aplicación de medidas, diseño de programas y planes, así como el oportuno seguimiento que garantice tanto la integración, contraloría y participación de las comunidades en igualdad de condiciones.
5. Propiciar la participación del ciudadano en las acciones de protección y resguardo de los ecosistemas. Esto implica “ayudar a las personas y grupos sociales para que desarrollen el sentido de responsabilidad, la toma de conciencia y la adopción de estrategias para prestar atención a los problemas del medio ambiente” (p.29).

Desde la perspectiva de Goleman (2009) los propósitos de la psicología ambiental giran en torno a la calidad de vida y al desarrollo sostenible, de allí que se le adjudiquen los siguientes:

1. Establecer nexos sinérgicos entre la ecología, las diversas formas de organización social y la preservación del medio ambiente.
2. Fomentar las experiencias individuales y colectivas, en las que prime el desarrollo sustentable y la protección al equilibrio de los ecosistemas.
3. Propiciar la neutralización tanto de los impactos ecológicos, y en consecuencia, la maximización de las oportunidades y beneficios para la salud del planeta y de las diversas formas de vida que en el existente.
4. Advertir sobre los riesgos potenciales del actuar humano, pero además, fortalecer los hábitos, perspectivas y estilos de vida sensibles al deterioro, así como el reconocimiento de las amplias, diversas y complejas redes de interacción entre los sistemas naturales y el ser humano.

## **CONCLUSIONES**

Una revisión de las posiciones en torno a la psicología ambiental deja ver los aportes de una disciplina cuya orientación es el acercamiento armónico del ser humano a los sistemas ecológicos, en un intento por construir lazos sólidos y conscientes que redimensionen el compromiso con la protección y resguardo los escenarios naturales que conforman el medio ambiente; esto refiere a una disciplina con objetivos precisos

enfocados en fomentar la comprensión del complejo entramado de relaciones que se dan en el contexto ecológico, como punto de partida para generar el sentido de corresponsabilidad sobre las acciones humanas que por sus implicaciones han motivado el deterioro de las condiciones de estabilidad y equilibrio a nivel global.

Frente a esta crisis mundial que supone el debilitamiento de los sistemas ecológicos y la alteración los escenarios naturales en los que se desarrolla la biodiversidad, la salida institucional sugiere un giro significativo en torno a la adopción de estrategias de prevención e intervención que aporten a la solución de los problemas medioambientales locales y mundiales, en el que se tome como elemento medular el entendimiento del contexto ecológico, trascendiendo hacia el abordaje de riesgos y la adopción de comportamientos responsables tanto en la dimensión individual como colectiva; esto plantea el redimensionamiento de la apreciación subjetiva de la compleja realidad ambiental, de la cual se derivan actitudes sensibles en las que prevalezcan los valores ecológicos sobre los económicos, consumistas y de focalizados en la producción irracional, con la finalidad de heredar a las humanidad mayores posibilidades para gozar de una vida saludable, sustentable y sostenible.

En consecuencia, el resguardo del medio ambiente inicia con el cambio en el proceder humano, en el que el foco sea la preocupación común por el equilibrio ecológico, la purificación de los suelos, fuentes de abastecimiento de agua potable, la limpieza del aire y el resguardo de las especies y su hábitat, limitando la incursión en zonas bajo régimen de protección especial que por constituir reservorios de biodiversidad, requieren un trato considerable con apego normativo que delimiten el actuar humano y privilegien la emergencia de comportamientos favorables al ambiente.

En síntesis, un acercamiento a la comprensión de la psicología ambiental como disciplina de la que depende la adopción de comportamientos ecológicos, exige la referencia a cometidos asociados con la sostenibilidad y la sustentabilidad, en los que el individuo alcance el establecimiento de vínculos empáticos con el medio ambiente y la biodiversidad, con el propósito de lograr el manejo eficiente de los recursos naturales no renovables; lo cual supone, una alternativa para el resguardo de la vida enfocada en redimensionar el bienestar humano y el equilibrio ecológico a través de una reducción consciente del manejo de materiales contaminantes a lo largo del ciclo vital, así como minimizar la emisión de desperdicios cuya toxicidad pudiera representar no solo una acción esperanzadora sino la adopción de hábitos saludables que eleven el óptimo desenvolvimiento de los sistemas ecológicos, en el que se trascienda de la satisfacción de las necesidades inmediatas por procesos de aprovechamiento en los que prime el vivir bien y mejor.

## REFERENCIAS

- Goleman, D. *Inteligencia ecológica*. Ciudad De México: Ediciones B.S.A de C.V. (2009).
- Holahan, Ch. *Psicología ambiental. Un enfoque general*. México: Limusa. (2000).
- Leff, E. *Racionalidad ambiental. La reapropiación social de la naturaleza*. Ciudad de México: Siglo XXI Editores. (2004).
- Leff, E. *Aventuras de la epistemología ambiental: de la articulación de ciencias a diálogo de saberes*. Ciudad de México: Siglo XXI Editores. (2006).

- Jiménez, C. *Calidad de vida*. Madrid: Biblioteca CF+S. (2010).
- Jordán, F. *Psicología: una introducción a las nociones fundamentales*. Córdoba: Editorial de la Universidad Católica de Córdoba. (2017).
- Maya, A. *La trama de la vida. Las bases ecológicas del pensamiento ambiental*. Bogotá: Instituto de Estudio Ambientales. (1997).
- Morales, J. Un acercamiento multidisciplinar a las dimensiones del desarrollo humano. *Revista Conocimiento Educativo*, Vol.8, pp.23-57. <https://doi.org/10.5377/ce.v8i1.12589> (2021).
- Morín, E. *La vía para el futuro de la humanidad*. Barcelona: Paidós. (2011).
- Morton, T. *Pensamiento ecológico*. Barcelona: Editorial Paidós. (2018).
- Moser, G. *Psicología ambiental. Aspectos de las relaciones individuo-medioambiente*. Eco-ediciones. (s.f).
- Rojas, J. (s/f). *Psicología ambiental. Ambiente, conducta y sostenibilidad*. Universidad de Costa Rica. (2000).
- Sabino, C. *Desarrollo y calidad de vida*. Unión Editorial. (2004).
- Sachs, J. *La era del desarrollo sostenible. Nuestro futuro está en juego: incorporemos el desarrollo sostenible a la agenda política internacional*. Barcelona: Ediciones Deusto. (2015).
- Saramona, J. *Desafíos de la escuela en el siglo XXI*. Barcelona: Editorial Octaedro. (2007).
- UNESCO. *Orientación y Desarrollo de Capacidades sobre Educación para la Ciudadanía Mundial en América Latina y el Caribe*. Reporte Informativo. Santiago de Chile. (2015).
- Zimmermann, M. *Psicología ambiental, calidad de vida y desarrollo sostenible*. Bogotá: Ecoe Ediciones. (2010).
- Zimmermann, M. *Pedagogía ambiental para el planeta en emergencia*. Bogotá: Ediciones Ecoe. (2013).

# **APROXIMACIÓN A LA VALORACIÓN DEL POTENCIAL MINERO DE DEPÓSITOS DE CALIZAS EN UN SECTOR DE LA PROVINCIA DE SAN JUAN**

Mariel Negrelli<sup>a</sup>, Gilda Neyra<sup>a</sup>, María J. Méndez<sup>a</sup>, María V. Soria<sup>a</sup> y Mónica S. Ramírez<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Investigaciones Mineras, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, ARGENTINA

e-mail: [marielnegrelli@gmail.com](mailto:marielnegrelli@gmail.com)

## **RESUMEN**

*Una de las principales actividades económicas de la provincia de San Juan es la dedicada a la extracción e industrialización de la piedra caliza para la elaboración de cales. Este recurso disponible en la Precordillera, representa una importante fuente de materias primas, lo que ha favorecido el emplazamiento de polos industriales de diferentes envergaduras. Uno de ellos, que posee significancia económica para la provincia, lo constituye la Sierra de Villicum en el Departamento Albardón. Sobre este cordón montañoso, en su sector central y austral, se extraen materiales carbonáticos requeridos por innumerables industrias. Para poder corroborar la continuidad de su potencial minero hacia el norte, se seleccionó e investigó un sector con altos contenidos de calcio y que podrían ser de interés para su explotación comercial. El área fue seleccionada por la buena exposición de sus bancos calcáreos, como así también su fácil accesibilidad para trabajos prospectivos y de muestreos, con el objeto de determinar contenido en carbonatos mediante análisis químicos. Los resultados obtenidos han reportado en un sector valores de CaO entre 54 – 55%, con bajos contenidos de residuos insolubles. Si bien los resultados son alentadores, es necesario realizar mayores trabajos de muestreos, para análisis geoquímicos y de cálculos de cubicación, para poder determinar y delimitar el potencial real del área considerada.*

Palabras Clave: Calizas, Prospección, Muestreo Geoquímico

## **INTRODUCCIÓN**

La explotación de los materiales carbonáticos en la provincia de San Juan es una fuente importante de ingresos para diversos sectores de la economía sanjuanina, siendo la más rentable aquella utilizada para la elaboración de cales, constituyendo un componente esencial para una gran variedad de procesos industriales.

Actualmente, el destino de la producción de cales es muy diverso y es principalmente utilizada en la construcción, en procesos siderúrgicos, en minería, en la industria química, papeleras, azucareras, curtiembres, en la fabricación de grasas lubricantes, potabilización de agua, como carga en pinturas, refractarios y recientemente en la agricultura, como regulador de pH y aporte de nutrientes básicos de calcio y magnesio al suelo. El aumento de la demanda justifica su expansión creciente y ha llevado a prospectar nuevos sectores de interés con potencial de contener materiales carbonáticos con altos contenidos de calcio/magnesio, que puedan ser explotados para su uso industrial.



Por tal motivo, esta investigación se enfocó en un estudio preliminar de un área ubicada en el extremo norte de la Sierra de Villicum, sobre su faldeo oriental, en donde se manifiestan materiales calcáreos.

### **Antecedentes Mineros**

Desde principios del siglo XX y hasta la actualidad, la provincia de San Juan se ha caracterizado por la producción de cal a partir de la explotación de canteras de caliza. Este recurso disponible ampliamente en Precordillera, ha favorecido el emplazamiento de polos industriales de diferente envergadura, uno de ellos se corresponde al Distrito Minero de Villicum dentro del denominado Campos de La Laja.

Este polo industrial ubicado en el departamento de Albardón presenta varios yacimientos de calizas, dolomías y travertinos emplazados sobre el flanco oriental de la sierra de Villicum.

El aprovechamiento de estos materiales calcáreos se registra a partir de 1945, en donde se explotaban alrededor de 18.000 toneladas anuales (Angelelli et al, 1980). La explotación de dolomía se registra a partir del año 1963.

En la actualidad CEFAS S.A, segunda productora de cal en la Argentina, que ha conformado una asociación con el Grupo Calidra, empresa mexicana cuarta productora de cal a nivel mundial, es la que opera en la zona de Villicum.

Más del 1% de la población total de Albardón trabaja en relación directa con la industria minera calera y se encuentran empleados en forma permanente en las empresas del ramo. Otro 2% está vinculado indirectamente mediante trabajos y servicios. Es decir que más de 600 personas del departamento Albardón están vinculadas a la actividad extractiva y comercial. Entre el 85 y 90 % del personal de las plantas caleras residen en la localidad.

De esta forma CEFAS incorporó a su operación un importante valor agregado de recursos, conocimientos técnicos y las mejores prácticas internacionales para optimizar sus productos y servicios. Posee una infraestructura adecuada para llevar a cabo la extracción, molienda, elaboración y transporte. La estación de embarque del ferrocarril, en el departamento Albardón, por su cercanía (18 km) favorece la comercialización de los productos.

El método de explotación de los materiales carbonáticos es a cielo abierto, por bancos descendentes. Para la perforación se utilizan equipos de aire comprimido o hidráulicos y el transporte del material se realiza por medio de camiones hasta la planta de trituración y clasificación.

### **Distribución Geográfica de las Formaciones Calcáreas – Área de estudio**

Las formaciones de materiales carbonáticos se distribuyen en la Provincia de San Juan en varios cordones montañosos elongados en dirección norte - sur, pertenecientes a la denominada Provincia Geológica de Precordillera. Se manifiestan como una extensa y potente faja integrada por sierras de unos 250 km de extensión, con alturas que no superan los 1.000 a 1.500 m sobre el nivel del mar (ver Fig 1).

Estos yacimientos, por su calidad, ubicación favorable para su explotación y por la cantidad del recurso disponible, ocupan un lugar importante en la economía sanjuanina. Los polos de explotación más significativos son los siguientes:

- Sector Norte, en la Sierra de San Roque en el Departamento Jáchal.
- Sector Centro, en las Sierras Chica de Zonda y Villicum, ubicados en los Departamentos de Pocito, Albardón y Ullum.
- Sector Sur, en la zona de Los Berros-Pedernal, en el Departamento Sarmiento.



**Figura 1.** Ubicación de los depósitos calcáreos en la provincia de San Juan

Nuestra área de estudio se focalizó en el norte de la Sierra de Villicum sobre su faldeo este, en el Departamento Albardón (ver Fig. 2).



**Figura 2.** Ubicación del área de estudio en el Departamento Albardón

Se ubica a 45 km al norte de la capital sanjuanina, accediendo a la misma por Ruta Nacional N°40. Desde aquí se continúa por calle Sarmiento hasta la Ruta Provincial 102, que va hacia el norte, a los Baños de La Laja. Dicha ruta es un camino consolidado que ingresa a la propiedad por la localidad llamada El Salado y a partir de aquí hacia el noroeste unos 8,5 km por huella antigua trazada sobre bajada pedemontana hasta el afloramiento de la Sierra.

### **Rasgos Geológicos**

En el Distrito Minero de Villicum, los centros de explotación de materiales carbonáticos están ubicados en el sector oriental de la sierra homónima.

Los estratos de calizas constituyen una sucesión de bancos carbonáticos del Ordovícico de la Fm. San Juan, con potencias de hasta 2 m; adoptan una estructura de anticlinal asimétrico, muy apretado, volcado al oeste y con buzamiento al norte. Los bancos en explotación tienen rumbo N 20° E y buzamiento 60° al E. Están constituidos por calizas de color gris a gris clara, de grano fino, intercaladas con bancos de alto contenido de ftanita; se encuentran pigmentadas y contaminadas por las arcillas terciarias que la suprayacen.

Las canteras de dolomías, en el sector austral de la Sierra de Villicum, pertenecen a la Formación Zonda del Grupo Marquesado (Cámbrico). La Formación Zonda está integrada por dolomías y dolomías cálcicas de colores grises claros, oscuros y blanquecinos, cuyos máximos espesores varían entre 300 y 400 metros. Los estratos poseen rumbos de N31° E y buzamientos de 60 a 70° E.

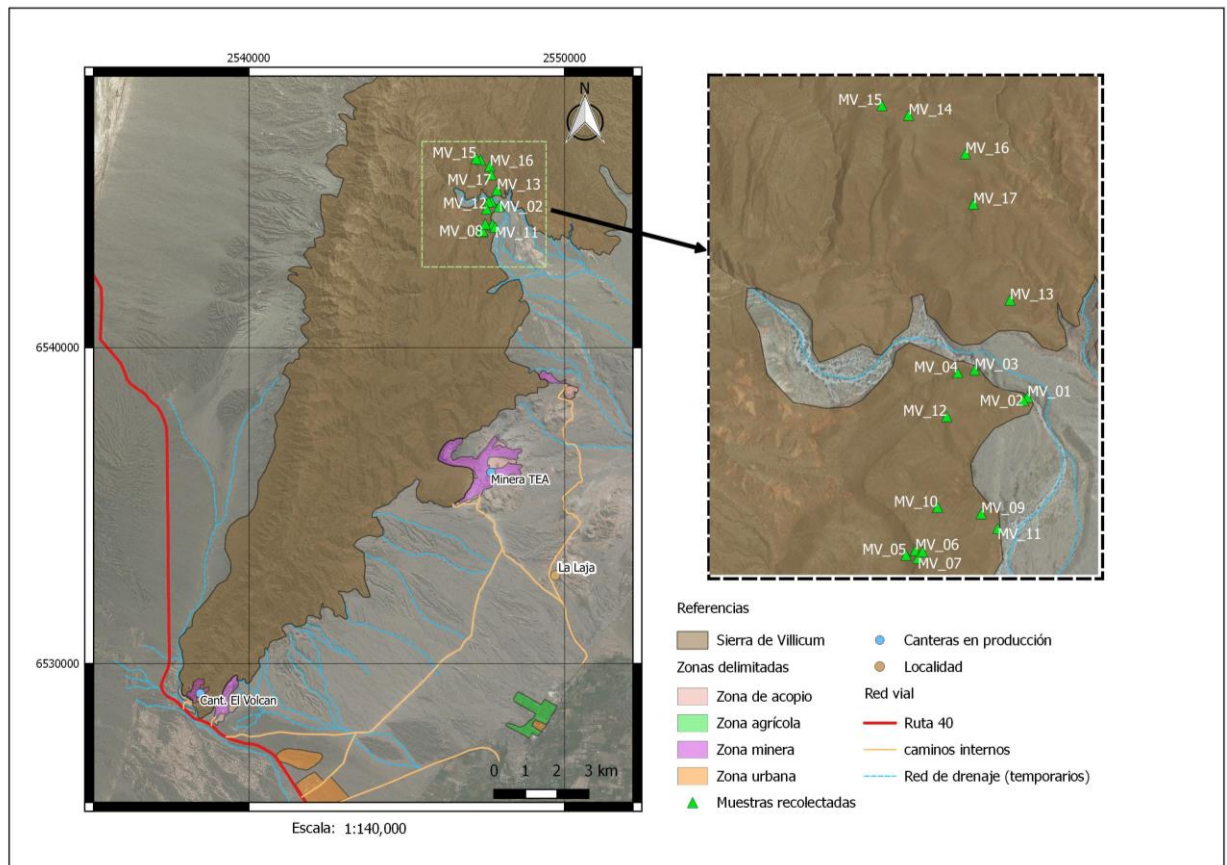
La geología local en el área de estudio se corresponde a la Formación San Juan y al Grupo Marquesado, compuesto por calizas el primero y calizas/dolomías el segundo.

### **MÉTODOS**

Para cumplir con el objetivo propuesto se tuvieron en cuenta antecedentes bibliográficos y mapas topográficos del área y se utilizaron imágenes satelitales provistas por Google Earth.

La prospección se organizó en dos campañas, en las cuales se hicieron estudios de campo (determinación de posiciones y extensiones de los afloramientos y asomos del mineral de interés) y muestreo de los diferentes afloramientos de las rocas calcáreas, tomando 17 muestras en total (ver Fig. 4).

Dichas muestras fueron analizadas en el Laboratorio del Instituto de Investigaciones Mineras de la UNSJ, con la finalidad de estudiar su composición química (% de OCa) y determinar su calidad (grado de pureza) para conocer si podrían satisfacer las solicitudes derivadas de los diferentes segmentos industriales.



**Figura 4.** Mapa de ubicación de las muestras de los afloramientos calcáreos

La concentración del “carbonato de calcio” determina el grado de pureza de la caliza, siendo las de mayor calidad los contenidos que superan al 90%.

Con respecto a los tenores del “residuo insoluble”, este parámetro determina el residuo que no se puede solubilizar en ácido clorhídrico como es el caso de la sílice, lo que representa una impureza muy significativa que influye en el proceso de calcinación, por lo que su valor debe ser inferior al 2%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Descripción de la geología local y datos relevados

En términos generales, los afloramientos presentan una dirección Noroeste con direcciones de rumbo e inclinación variable. Se observaron calizas grises oscuras con segregación de calcita y con restos silicificados de braquiópodos (ver Fot. 1).

En esa misma línea de observación, se encuentran estratos horizontales cubriendo una superficie aproximada de 122.000 m<sup>2</sup>, compuestos por calizas de tonalidades gris oscura (ver Fot. 2), con nódulos de pedernal de manera aislada y restringido a zonas altas.

Hacia el oeste las calizas continúan aflorando en estratos casi verticales, con rumbos de aproximadamente 45° (ver Fot. 3), las mismas poseen menor segregación de sílice y con algunas intercalaciones arcillosas.



**Fotografía 1.** Calizas con restos silicificados de braquiópodos



**Fotografía 2.** Muestra de caliza



**Fotografía 3.** Calizas Fm. San Juan, mostrando su buzamiento vertical.

A continuación, se exponen los resultados de los análisis químicos en la Tabla I de las muestras extraídas en el área de estudio y su representación en los correspondientes mapas de concentración (ver Fig. 5 y 6).

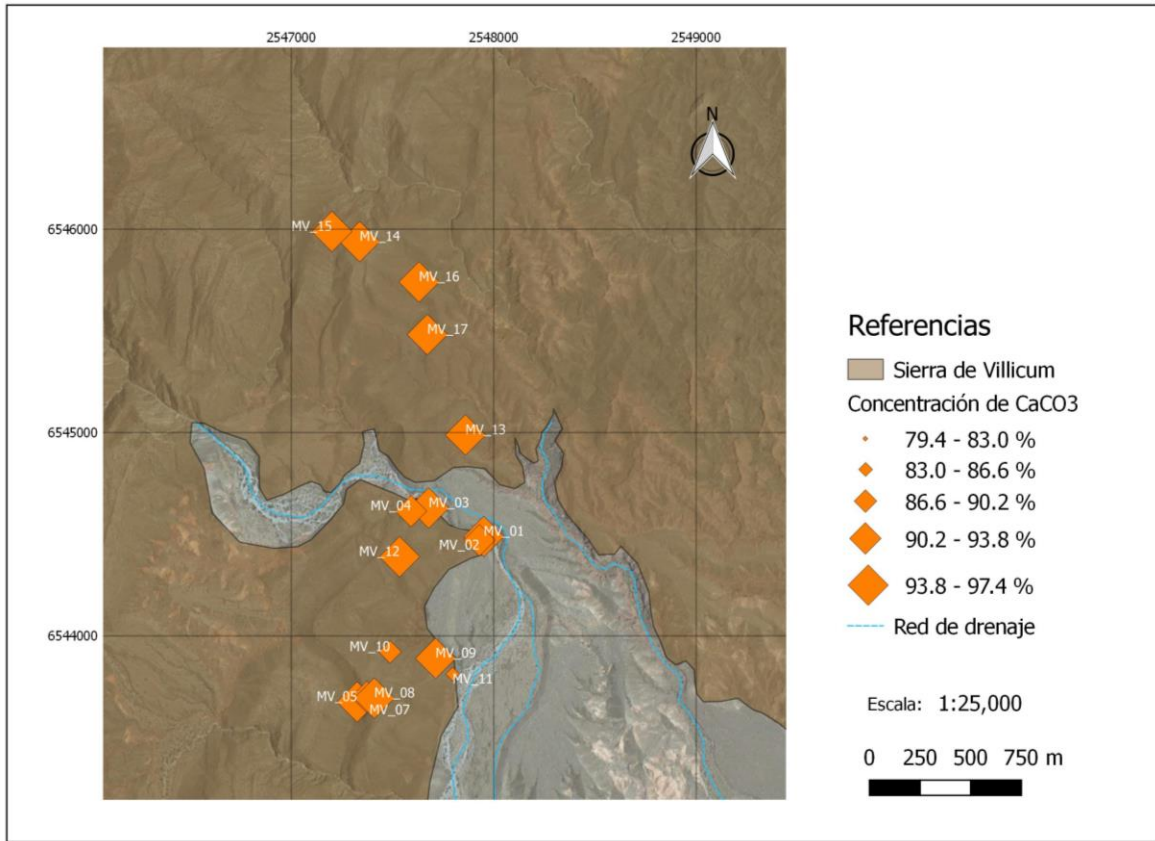
Tabla I. Análisis químico de las muestras.

Muestra Denominación	P a 105° %	PPC %	CaO %	CO <sub>3</sub> Ca % (PPC + CaO)	Res. Ins %	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	MgO %
MV1	0,14	42,1	51,74	93,84	3,98	1,11	1,33
MV2	0,13	42,2	51,13	93,33	3,3	1,38	1,77
MV3	0,1	42,18	53,59	95,77	3,7	0,58	0,22
MV4	0,16	41,75	51,74	93,49	4,38	0,71	1,33
MV5	0,12	41,59	52,98	94,57	3,84	0,49	0,44
MV6	0,15	41	51,13	92,13	5,92	0,96	0,44
MV7	0,12	35,05	44,35	<b>79,4</b>	<b>17,48</b>	0,62	2,22
MV8	0,13	42,63	52,36	94,99	3,66	0,13	0,89
MV9	0,13	42,3	52,98	95,28	3,32	0,27	0,44
MV10	0,12	38,95	48,66	<b>87,61</b>	<b>10,36</b>	0,42	1,33
MV11	0,14	38,11	48,05	<b>86,16</b>	<b>12,92</b>	0,44	0,44
MV12	0,07	42,25	55,09	<b>97,34</b>	<b>0,18</b>	0,16	0,51
MV13	0,1	42,34	55,09	<b>97,43</b>	<b>0,54</b>	0,21	0,51
MV14	0,05	42,56	54,73	<b>97,29</b>	<b>0,32</b>	0,1	0,77
MV15	0,02	41,43	52,94	<b>94,37</b>	<b>0,5</b>	0,42	1,54
MV16	0,02	42,35	54,87	<b>97,22</b>	<b>0,06</b>	0,22	1,03
MV17	0,04	42,14	54,01	<b>96,15</b>	<b>0,44</b>	0,13	1,03

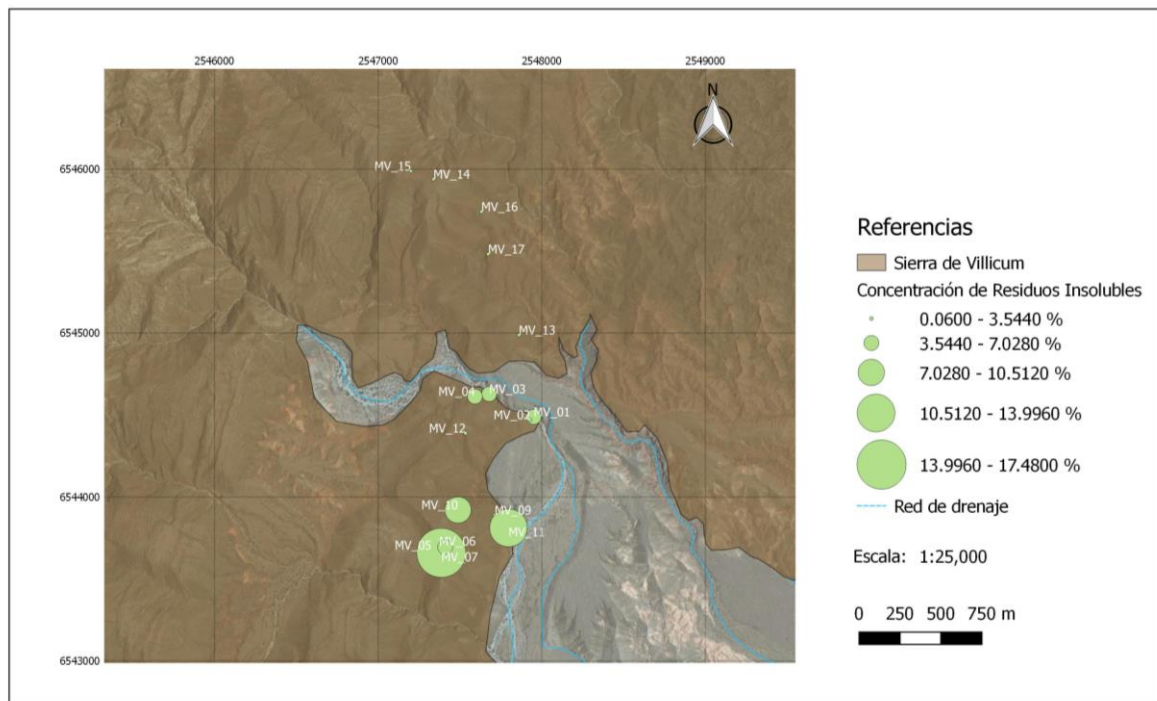
Los porcentajes de carbonato de calcio obtenidos demuestran, en base a la clasificación química dada en Mineralogy and Petrology Group (British Geological Survey, 1993), que un grupo de ellas, cuyos resultados están representados en la Tabla I en color verde, entran en el rango de mediana a alta pureza. A su vez, estas concuerdan con los bajos tenores de residuos insolubles.

Las tres únicas muestras que presentan valores poco satisfactorios (muestras MV7, MV10 y MV11), representadas en color rojo, corresponden a bancos superficiales de unos 5 metros de espesor asociados a algunas zonas de fracturas. En ellos, existe presencia de chert y se encuentran en el sector sur de la propiedad.

A continuación, en las Fig. 5 y 6, se representan las concentraciones del carbonato de calcio y del residuo insoluble.



**Figura 5.** Mapa que representa la concentración del carbonato de calcio.



**Figura 6.** Mapa que representa la concentración del residuo insoluble.

Se evaluó de manera preliminar el recurso existente en el sector que presentó las calizas de mayor calidad para la obtención de óxido de calcio, con los menores contenidos de los residuos insolubles, lo que se muestran en la Tabla II.

Este sector posee un área 969.000 m<sup>2</sup> y para el cálculo se consideraron porcentajes de carbonatos de calcio promedio y, según mapeo y antecedentes de la zona, se estimó con una potencia 30 metros.

Tabla II. Recursos Inferidos

Área m <sup>2</sup>	Potencia m	Volumen m <sup>3</sup>	Densidad de roca	Tonelaje TN	CaCO <sub>3</sub> %	Recurso Exploratorio TN
969.000	30	29.070.000	2,7	78.489.000	96,65	75.859.618,50

## CONCLUSIONES

- El material calcáreo que se extrae de la sierra de Villicum, ha sido considerado como material de alta calidad por su elevado contenido de carbonato. Actualmente dos empresas se encuentran en producción, las que comercializan sus productos en el mercado nacional e internacional.
- El área considerada para nuestro estudio posee calizas con medianos a altos contenidos de óxidos de calcio. La mayor parte de las muestras arrojaron valores comprendidos entre 51 – 53 % de óxido de calcio y en algunos casos superiores al 55%.
- Las muestras que arrojaron valores superiores al 55% de óxido de calcio, presentan muy bajos tenores en residuos insolubles (<2%), lo que permiten inferir que, dentro del área considerada, en su porción norte, pueden ser utilizadas a nivel industrial.
- Se recomienda realizar un muestreo más detallado del sector seleccionado para su posterior explotación. Dicho muestreo sería más que nada para determinar reservas y discriminar los sectores de mejor calidad.

## REFERENCIAS

- Carta de Minerales Industriales, Rocas y Gemas 3169-IV San Juan. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Secretaría de Minería Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Buenos Aires (2012).
- Angelelli, V., I Schalamuk y R. Fernández. Los yacimientos de minerales no metalíferos y rocas de aplicación de la región Centro – Cuyo. (provincias de Córdoba, Santiago del Estero, San Luis, Mendoza y San Juan) Anales XIX. Secretaría de Estado de Minería. 251 (1980)
- Harrison, D.J. Industrial minerals laboratory manual: limestone. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey, 53 p. Technical Report WG/92/29. (1993)



# DISCRIMINACIÓN LITOSTRATIGRÁFICA, PETROGRÁFICA Y GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN TARQUI EN EL CORTE CAÑAR - AZOGUES

Roberto Pulupa<sup>a</sup>, Darío Calderón<sup>a</sup>, Christian Romero<sup>a</sup>, Fausto Carranco<sup>a</sup>, Juan Torres<sup>a</sup>, Ana Gramal<sup>a</sup>, Paola Pazmiño<sup>b</sup>, Daniel Maya<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Investigación Geológico y Energético, Quito, Ecuador.

<sup>b</sup> Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

e-mail: [anibal.pulupa@geoenergia.gob.ec](mailto:anibal.pulupa@geoenergia.gob.ec)

## RESUMEN

Anteriormente algunos autores reportaron en la Formación Tarqui rocas piroclásticas y flujos de lavas andesíticas a riolíticas, basándose en estudios de traza de fisión en circones (ZFT  $6.3 \pm 1.0$  Ma;  $5.4 \pm 0.6$  y  $7.8 \pm 0.8$  Ma), los ubican en el intervalo del Mioceno Superior al Plioceno. Esta investigación presenta nuevos datos litoestratigráficos, petrográficos y geoquímicos de la Formación Tarqui en el trayecto desde Azogues hasta Cañar, al sur del Ecuador, la misma que sobreyace en discordancia a la Formación Turi. Al este de Cañar, la Formación Tarqui presenta un dominio de: brechas piroclásticas matriz soportada estratificadas, con fragmentos angulares andesíticos y riolíticos, clastos subangulares de pómez y niveles con diseminación de sulfuros (GMS), tobas finas con cristales de cuarzo y plagioclasa (TF); tobas gruesas con textura cinerítica, con líticos dacíticos, lutitas, chert y fiames (TG). Las litofacies GMS, TF y TG son agrupadas en el Miembro Chaparro. Al noreste de Azogues, Formación Tarqui incluye a tobas finas con cristales de plagioclasa, cuarzo, hornblenda, biotita y líticos riolíticos (TR) intercaladas con limolitas multicolores con clastos subredondeados de andesitas, dacitas y lutitas (PL) y litoareniscas gruesas con estratificación cruzada (ST). Las litofacies TR, PL y ST definen al Miembro Llacao. En base a la interestratificación del Miembro Llacao y el Miembro Chaparro se sugiere contacto transicional entre ambos miembros. El registro litoestratigráfico indica que el Miembro Chaparro contiene facies proximales al arco volcánico, mientras que el Miembro Llacao agrupa facies distales al arco. En el tope de la Formación Tarqui se observa andesitas porfíricas con fenocristales de plagioclasa y hornblenda (AN); y dacitas con fenocristales de plagioclasa, feldespato y cuarzo (DC); intercalados con brechas volcánicas clastos soportados masivos (GCM). Radios Zr/Ti ( $\sim 0.95$ ) vs Nb/Y ( $\sim 1.2$ ) sugieren composición andesítica a dacítica, mientras que las concentraciones Th ( $\sim 1.1$  ppm) y Co ( $\sim 26$  ppm) indican afinidad calco-alcalina. Las relaciones La, Y y Nb, indican que estas lavas emergieron a través de una corteza continental engrosada, esto sugiere una tectónica compresiva.

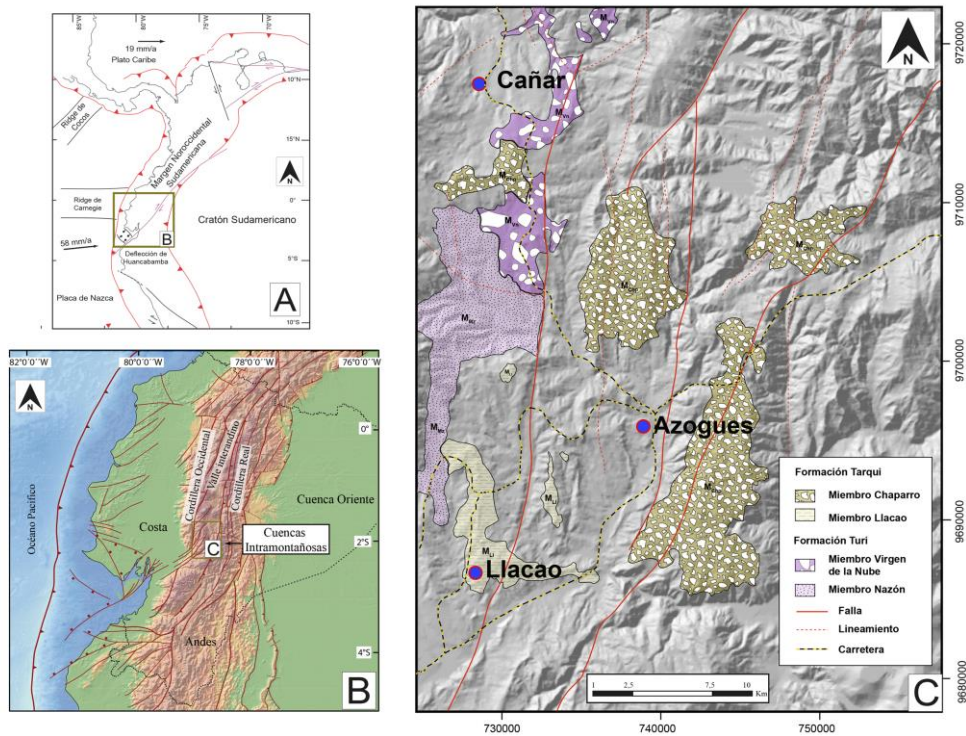
Palabras Clave: Formación Tarqui, Litoestratigrafía, Petrografía, Geoquímica, Azogues, Cañar, Ecuador.

## INTRODUCCIÓN

Al norte de la deflexión de Huancabamba, la principal característica morfológica de la Margen Noroccidental Sudamericana la constituyen los Andes del Norte (ver Fig. 1A); en Ecuador están compuestos de oeste a este por: la Cordillera Occidental, el Valle Interandino y la Cordillera Real (Romero et al., 2021). Al sur de los Andes ecuatorianos, las cuencas Intramontañosas guardan el registro del volcanismo del Mioceno, además de múltiples secuencias volcanoclásticas y sedimentarias

contemporáneas a este volcanismo (Hungerbühler, 2002) (ver Fig. 1B). Series de sedimentos clásticos y secuencias volcánicas del Mioceno Medio al Pleistoceno en la región interandina, muestran la historia tectónica reciente del Arco del Neógeno de los Andes al sur del Ecuador (Marocco et al., 1995). Las cuencas Intramontañosas incluyen las cuencas de: (1) Cuenca, (2) Girón-Santa Isabel, (3) Loja (4) Malacatos - Vilcabamba y (5) Nabón (Steinmann et al. 1999, Hungerbühler, 2002).

Volcánicos continentales del Oligoceno y Mioceno Temprano del Grupo Saraguro y la Formación Loma Blanca constituyen el basamento de las cuencas Intramontañosas, la litoestratigrafía de estas cuencas agrupa dos mega-secuencias, la mega-secuencia inferior incluye depósitos continentales costeros a marinos someros (formaciones Biblián, Loyola, Azogues, Mangán, Jacapa, Burruhuaycu, Girón, Nabón, entre otras), depositados probablemente en ambiente extensivo (Hungerbühler, 2002; George, 2019; Solís, et al., 2021). Al final del Mioceno Superior se documentó una superficie de erosión regional que refleja el cambio de dominio tectónico en la región de extensivo a compresivo (Hungerbühler, 2002). La mega-secuencia superior es caracterizada por el desarrollo de potentes depósitos continentales con dominio del arco volcánico del Mioceno Superior, esta secuencia incluye a las Formaciones Turi y Tarqui (Steinmann et al. 1999) (ver Fig. 1C).



**Figura 1.** Mapa de Ubicación. **A.** Esquema tectónico de la margen noroccidental sudamericana, modificado de Torres et al., 2021 y Romero et al., 2021. **B.** Esquema de regiones morfológicas del Ecuador, modificado de Romero et al., 2019. **C.** Localización de las Formaciones Tarqui y Turi en las cuencas Intramontañosas en la sección Cañar - Azogues.

La Formación Turi fue inicialmente descrita en el área de Cuenca, al suroeste de Turi, como una secuencia de conglomerados, arcillolitas, areniscas, tobas y brechas volcánicas de origen fluvial con influencia volcánica (Erazo, 1957); posteriormente fue

identificada en el área de Girón, donde se observaron gruesos estratos de tendencia grano decreciente de areniscas tobáceas confinadas en canales interestratificados entre finos estratos de tobas de composición dacítica (Randel y Lozada, 1974). Hungerbühler, 2002, presentó edades de traza de fisión en circones (ZFT) de  $10,5 \pm 2,2$ ;  $8,0 \pm 2,2$  y  $7,4 \pm 1,2$  Ma para la base de la Formación Turi.

La Formación Tarqui es la serie volcánica del Mioceno Superior con mayor extensión en el sur de los Andes ecuatorianos (Hungerbühler, 2002). Esta secuencia fue reportada por primera vez al suroeste de Cuenca como una potente secuencia de tobas ácidas y brechas volcánicas (UNDP, 1969); a escala local esta serie incluye varias litologías (brechas volcánicas de composición riolítica a andesítica, tobas de ceniza, flujos piroclásticos e ignimbritas), por lo cual, varias unidades litoestratigráficas han sido discriminadas por diversos autores (por ejemplo miembros Tarqui, Llacao y Tambo Viejo; Steinmann, 1997 y Hungerbühler, 1997. Steinmann, 1997 presentó edades ZFT de  $6.8 \pm 0.8$  y  $5.5 \pm 0.6$  Ma para el tope de la Formación Tarqui.

Si bien es cierto, las Formaciones Turi y Tarqui han sido caracterizadas a detalle en el área de Cuenca, en otras cuencas Intramontañosas estas secuencias presentan variaciones laterales poco estudiadas. La sección geológica Cañar - Azogues ofrece la posibilidad de analizar minuciosamente la litoestratigrafía de las formaciones Turi y Tarqui, en grandes exposiciones de buena continuidad lateral anteriormente no reportadas. El objetivo de la presente investigación es presentar el detalle litoestratigráfico, petrográfico y geoquímico de la Formación Tarqui y su correspondiente discriminación (ver Figura 1C).

## **MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL**

La cartografía geológica incluyó la geo-referenciación de afloramientos, discriminación litológica de muestras tipo, análisis de estructuras sedimentarias, y descripción del estilo de apilamiento de secuencias volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias (Walker, 1990); con esta información se realizó la discriminación de litofacies que agrupan a rocas de similar composición mineralógica, características texturales y estructurales, depositadas en un mismo ambiente de sedimentación (Sengupta, 2017). En el levantamiento de información estructural se consideraron diaclasas y fallas, estos datos fueron recolectados siguiendo los protocolos establecidos y descritos a detalle por Petit 1987, las imágenes satelitales permitieron filtrar lineamientos de la cartografía regional y redefinir trazos de fallas (ver Fig. 1C).

En afloramientos tipo o representativos se recolectaron 27 muestras que fueron utilizadas en secciones delgadas, con el objetivo de identificar y cuantificar facies minerales y describir su textura. Los análisis geoquímicos de 4 muestras fueron realizados en el laboratorio químico del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), del Ecuador e incluyeron la identificación y cuantificación de elementos mayores, elementos traza y tierras raras. En el procesamiento de las muestras se utilizaron trituradoras y pulverizadoras con discos de carburo de tungsteno, para análisis de elementos mayores se utilizó Fluorescencia de Rayos X – XRF (con perla fundida), para elementos traza, se utilizó Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente - ICP - OES (con digestión total 4 ácidos) y para tierras raras se empleó Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente - ICP - MS (con digestión por fusión alcalina). Los resultados de los análisis fueron reportados en base anhídrida, normalizada al 100%. Adicionalmente, se recopilaron y consideraron

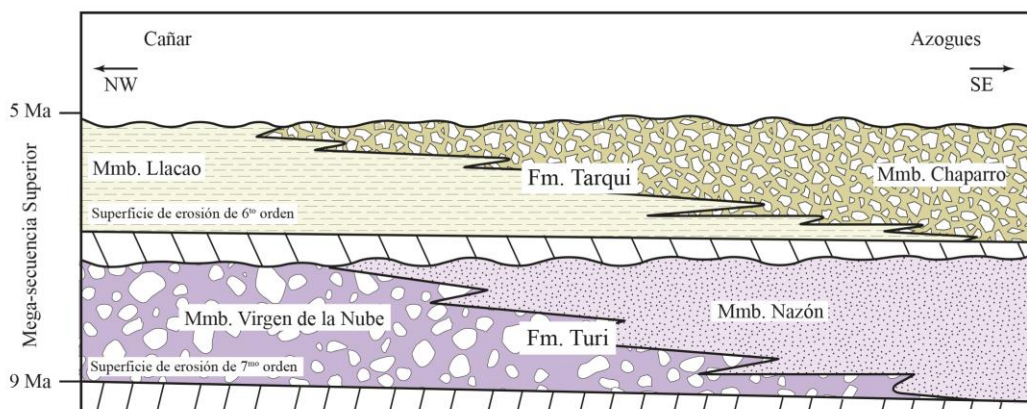
datos geoquímicos reportados por: Noblet et al., 1996; BGS-DINAGE, 1997; Chiaradia, et al., 2004; Shutte, 2010; Ludwig, 2019, con el objetivo de generar un espectro geoquímico y campos de relación para la Formación Tarqui. El detalle completo de los análisis geoquímicos se presenta en la Tabla 2. Finalmente, para la generación de los diagramas de geoquímica se utilizó el software GCDKit 3.2 siguiendo los protocolos reportados por Yu, 2019.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Relaciones de campo y litofacies de la Formación Tarqui

Al este y sur de Cañar en el trayecto Cañar - Azogues, brechas piroclásticas, conglomerados, areniscas conglomeráticas y limolitas de la Formación Turi cubren en discordancia a conglomerados y areniscas de la Formación Mangán y son sobreyacidos por la Formación Tarqui (ver Figura 2).

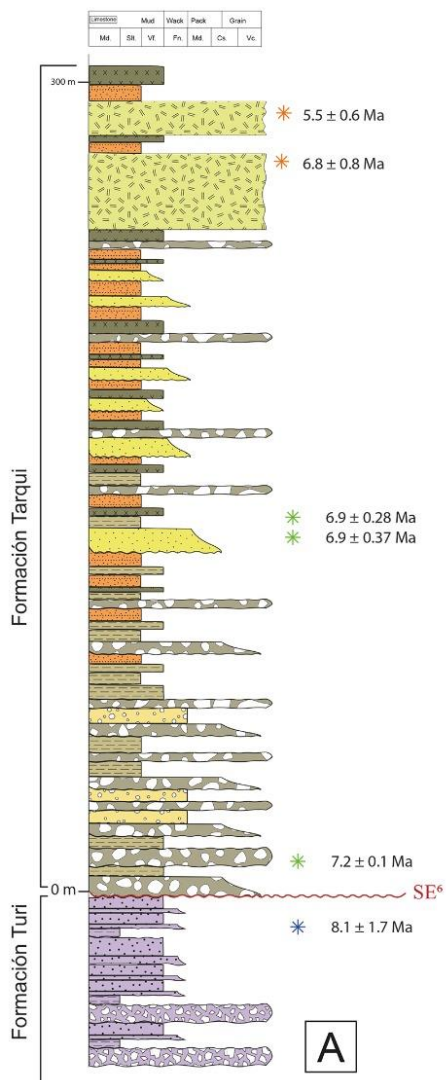
La Formación Turi fue discriminada en los miembros Virgen de la Nube y Nazón en función de las variaciones laterales observadas. El Miembro Virgen de la Nube tiene un espesor de 300 m, en su base se observan conglomerados polimícticos (clastos subredondeados de composición y metamórfica), matriz soportados (matriz limo-arenosa), de color gris con tonalidades púrpuras. Al tope de la secuencia se observan gruesos estratos con buena continuidad lateral, compuestos por intercalaciones de areniscas finas, limolitas arenosas verdes, finas capas de tobas arenosas y pómez. El miembro Nazón consiste en una secuencia de 600 m de potencia, litológicamente compuesta por limolitas arenosas de color gris con tonalidades cafés; conglomerados gruesos, pobremente sorteados y esporádicas brechas volcánicas. En asociación los miembros Virgen de la Nube y Nazón pueden ser interpretados como depósitos fluviales con influencia volcánica (Steinmann, 1997).



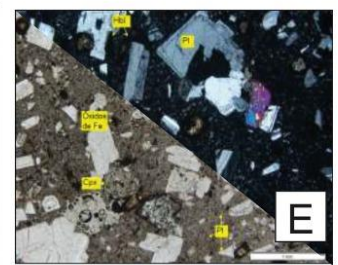
**Figura 2.** Relaciones estratigráficas de las formaciones Turi y Tarqui, en la sección Cañar – Azogues.

La Formación Tarqui cubre en discordancia a la Formación Turi (Hungerbühler, 1997) (ver Figuras 2 y 3A); fue dividida en los miembros Chaparro y Llacao. El Miembro Chaparro corresponde a una secuencia de 300 m de espesor, formada por rocas volcanoclásticas, incluye estratos de geometría lobular, lateralmente discontinuos, de relieve positivo, compuestos por brechas matriz soportadas (matriz limo-arenosa), polimícticas, con abundantes fragmentos piroclásticos de composición andesítica y

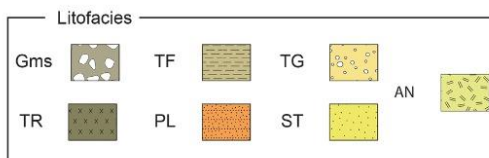
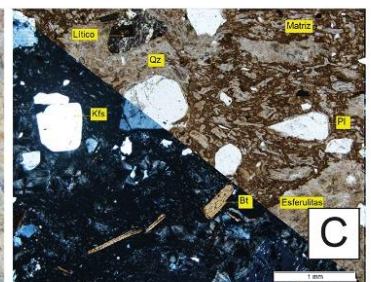
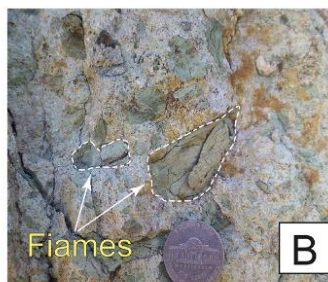
riolítica y diseminación de sulfuros (Litofacies *GMS*); tobas finas con cristales de cuarzo y plagioclasa (Litofacies *TF*); tobas gruesas con líticos de dacita, lutita y chert, con textura cinerítica y fiames (Litofacies *TG*) (ver Figura 3 y Tabla 1). Las litofacies *GMS*, *TF* y *TG* indican que el Miembro Chaparro contiene flujos de escombros proximales a centros volcánicos (Miall, 2014). Al noreste de Azogues el Miembro Llaoco consiste de una secuencia de 150 m de espesor, que agrupa tobas finas con cristales rotos de plagioclasa, cuarzo, hornblenda, biotita y líticos riolíticos (Litofacies *TR*), intercaladas con limolitas multicolores con clastos sub-redondeados de andesitas, dacitas y lutitas (Litofacies *PL*) y litoareniscas gruesas con estratificación cruzada (Litofacies *ST*) (ver Tabla 1 y Figura 3); en asociación las litofacies *TR*, *PL* y *ST* indican un entorno fluvial con influencia volcánica distal (Miall, 2014). Al tope de la Formación Tarqui se observan andesitas grises porfiríticas con fenocristales de plagioclasa y hornblenda y dacitas blancas con tonalidad café, porfiríticas con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y hornblenda intercaladas entre estratos gruesos de tobas finas con cristales de plagioclasa y hornblenda.



Miembro Llaoco



Miembro Chaparro



- \* ZFT: Trazas de fisión en circones reportadas por: Steinmann, (1997)
- \* U/Pb: Edad de cristalización U/Pb en circones reportada por Ludwing, (2019)
- \* U/Pb: Maxima edad de sedimentación, U/Pb en circones reportada por George, (2019)

**Figura 3.** A. Columna estratigráfica de la Formación Tarqui en la sección Cañar - Azogues. B. Afloramiento tipo del Miembro Chaparro. C. Lámina delgada del Miembro Chaparro. D. Afloramiento tipo del Miembro Llacao. E. Lámina delgada del Miembro Llacao.

**Tabla 1.** Resumen de litofacias documentadas en la Formación Tarqui.

Litofacias	Descripción	Interpretación
Miembro Chaparro		
GMS	Brechas oligomíticas, matriz-soportadas.	Flujos de escombros proximales a fuente volcánica
TF	Tobas finas con cristales rotos de plagioclasa.	
TG	Tobas gruesas con textura cinerítica.	
Miembro Llacao		
TR	Tobas finas con líticos riolíticos.	Depósitos fluviales con influencia volcánica proximal
PL	Limolitas multicolores con clastos volcánicos.	
ST	Litoareniscas gruesas con estratificación cruzada.	
AN	Andesitas grises porfíricas con fenocristales de plagioclasa y hornblenda.	Depósitos volcánicos primarios
DA	Dacitas blancas con tonalidades café y rosada, porfíricas con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y hornblenda.	

### Geoquímica

Noblet et al., 1996; BGS-DINAGE, 1997; Chiaradia, et al., 2004; Shutte, 2010; Ludwig, 2019, presentaron el detalle geoquímico de la Formación Tarqui en Azogues y el sur de Cuenca, en el área Girón - Santa Isabel; estos datos fueron incluidos en el conjunto de muestras analizadas en la sección Cañar - Azogues presentados en esta investigación, con el objetivo de definir la geoquímica de esta secuencia (ver Tabla 2).

**Tabla 2.** Resultados de análisis geoquímicos de la Formación Tarqui.

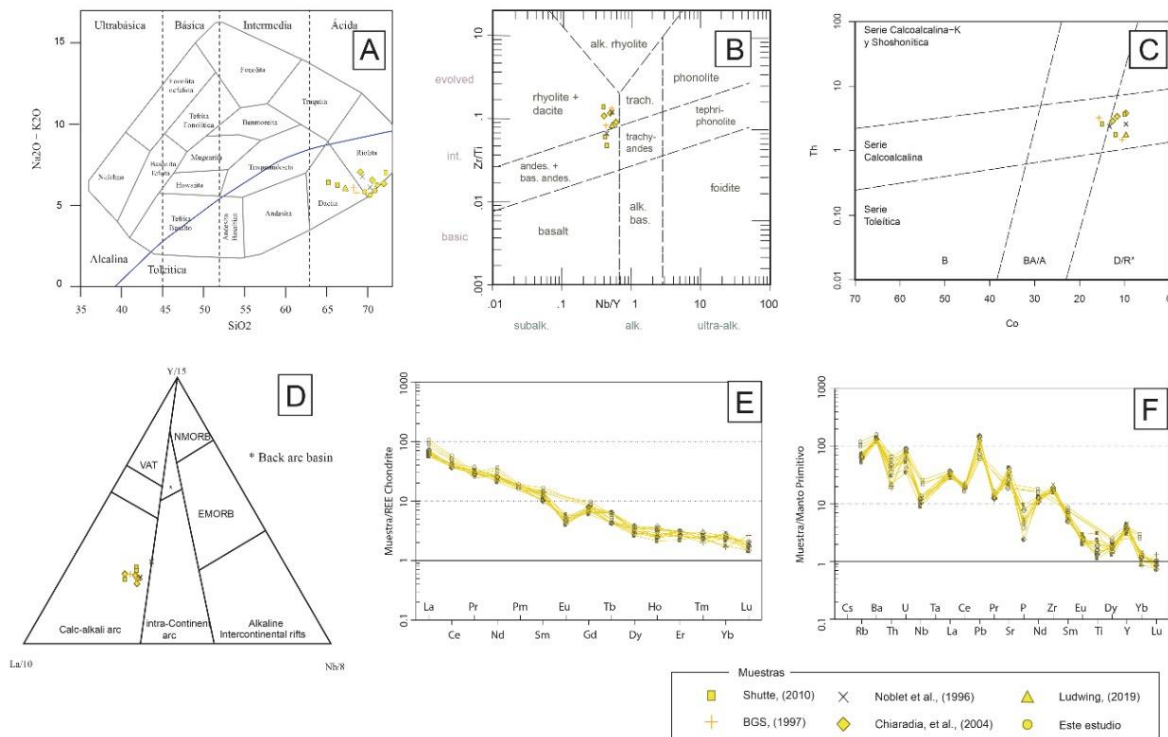
Datos Geoquímicos															
Muestras	Formación Tarqui														
	E94021	E99003	E99007	LC024	ECCC 031	ECCC 032	EC-MC02	EC-MC10	RC2004-25	RC2004-26	RC2004-27	AP1-00057-M2	CA1-00069-M1	AP1-00148-M1	AP1-00283-M1
Óxidos mayores (%W)															
SiO <sub>2</sub>	65,25	72,11	66,26	67,12	70,41	69,32	68,48	68,52	69,16	71,82	70,46	70,6	71,39	74,29	71,42
TiO <sub>2</sub>	0,63	0,23	0,48	0,39	0,41	0,27	0,33	0,44	0,38	0,32	0,27	0,32	0,17	0,07	0,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,1	15,28	18,16	16,28	15,42	16,1	15,53	16,71	15,28	16,15	16,96	13,71	12,42	11,82	13,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,08	1,92	3	2,86	3,2	2,72	2,68	3,1	2,76	2,72	3	0,88	1,36	0,22	1,78
MgO	0,22	0,34	0,29	0,31	0,26	0,37	0,28	0,34	0,31	0,37	0,41	0,04	0,21	0,02	0,04
MnO	0,03	0,07	0,04	0,09	0,05	0,06	0,04	0,06	0,05	0,07	0,06	0,06	0,02	0,01	0,06
CaO	2,62	2,16	3,52	3,18	2,69	2,82	3,27	3,81	2,22	2,16	2,19	0,85	0,78	0,45	0,11
Na <sub>2</sub> O	4,57	5,01	4,8	4,51	4,36	4,96	4,57	4,14	5,06	4,43	4,42	1,37	1,65	1,05	0,47
K <sub>2</sub> O	1,76	1,98	1,49	1,52	1,75	1,82	1,42	1,65	1,89	1,92	2,11	4,15	4,61	6,76	4,36
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,11	0,2	0,17	0,1	0,09	0,12	0,1	0,08	0,05	0,16	0,04	0,01	0,01	0,05
LOI	1,27	1,01	1,72	1,22	1,08	1,19	1,25	1,62	1,67	1,52	1,01	0	0	0	0
Total	95,58	100,22	99,96	97,65	99,73	99,72	97,97	100,49	98,86	101,53	101,05	92,02	92,62	94,7	92,08

Elementos traza (ppm)															
Sc	6	2	3	3	4	2	2	3	3	4	3	0	0	0	0
V	33	10	68	42	35	37	42	33	30	34	30	35,74	22	12,63	28,4
Co	12	10	15	10	16	11	12	10	13	12	10	0	0	0	0
Ni	3	5	3	6	3	4	3	4	5	3	7	12	0	0	0
Ti	3776,9	1378,9	2877,6	2338,1	2458	1618,7	1978,4	2637,8	2278,1	1918,4	1618,7	1500,3	1239,3	394,9	493,8
Cu	14	3	22	17	20	19	22	24	16	18	20	0	0	0	0
Zn	68	77	70	68	83	70	68	72	75	68	74	0	0	0	0
Rb	34	45	32	38	40	41	39	42	38	44	40	106	115	81	102
Sr	624	435	859	538	712	608	596	612	732	826	529	30	42	14	52
Y	13	19	16	15	16	17	15	20	15	17	16	19	10	12	12
Zr	173	183	167	184	196	204	228	170	198	200	182	0	0	0	0
Nb	6	8	7	8	7	9	8	9	9	7	8	0	0	0	0
Ba	928	891	791	811	920	856	823	852	869	873	925	1004	824	827	912
La	19,4	21,6	18,7	20,6	21,22	23,6	19,8	18,6	22,8	23,7	21,5	21,53	22,51	16,69	10,44
Ce	35,7	35,2	32,4	37,2	31,6	33,4	34,6	35,4	34,9	33,5	31,5	43,13	40,08	34,29	21,37
Pr	3,4	3,6	3,7	4,1	3,22	3,05	3,6	3,4	3,3	3,15	3,22	5,11	4,02	3,56	2,35
Nd	15,2	13,2	16,8	14,22	16,13	15,9	16,4	15,2	13,8	16,4	15,8	20,61	14,27	14,49	9,59
Sm	2,7	2,1	2,5	2,5	2,8	2,6	2,5	2,33	2,9	2	2,1	3,71	1,85	2,37	1,65
Eu	0,46	0,42	0,31	0,36	0,32	0,32	0,33	0,37	0,41	0,39	0,36	0	0	0	0
Gd	1,66	1,73	2,2	1,9	2,1	1,86	1,96	1,75	2,15	1,86	2,22	3,73	1,73	2,06	1,6
Tb	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,19	0	0	0
Dy	0,9	1,1	1,3	1	1,2	1,3	1,1	1	1,3	1	1,2	3,47	1,48	2	2,05
Ho	0,15	0,17	0,22	0,19	0,23	0,17	0,18	0,19	0,24	0,17	0,26	0,26	0	0	0
Er	0,5	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	1,95	0,8	1,03	1,19
Tm	0,08	0,08	0,07	0,09	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0	0	0	0
Yb	0,51	0,48	0,39	0,56	0,37	0,52	0,64	0,55	0,61	0,57	0,52	1,89	0,94	1,02	1,38
Lu	0,05	0,06	0,05	0,06	0,09	0,07	0,06	0,07	0,05	0,06	0,07	0	0	0	0
Hf	0,12	0,08	0,09	0,1	0,09	0,1	0,08	0,09	0,08	0,1	0,09	0	0	0	0
Pb	22	13	20	19	16	15	21	20	23	22	22	0	0	0	0
Th	1,8	3,6	2,5	1,7	3,1	1,5	2,7	2,5	2,9	3,4	3,8	13,8	14,8	7,5	6,4
U	0,7	1,1	1,8	1,6	1,2	1,5	0,9	0,8	1,6	1,8	1,2	1,6	0,2	0,1	0,1

El espectro geoquímico reportado para la Formación Tarqui está caracterizado por altas concentraciones de SiO<sub>2</sub> (65,25 - 72,11 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15,28 - 18,16%) y álcali total (5,79 - 7%); moderadas concentraciones de CaO (2,16 - 3,81%) y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,92 - 2,86%). Las concentraciones de álcali vs. Sílice presentes en el set de muestras analizadas siguieren composición dacítica a riolítica para la Formación Tarqui (Cox et al., 1979) (ver Figura 4A). Las concentraciones de óxidos mayores son concordantes con ratios de Zr/Ti (0,045 - 0,133) y Nb/Y (0,411 - 0,6), que indican una composición litológica de andesitas a dacitas (Pearce, 1996) (ver Figura 4B). Las concentraciones de Th (1,8 - 3,8 ppm) y Co (10 - 15 ppm) indican afinidad calco-alcalina para la Formación Tarqui (Hastie et al., 2007) (ver Figura 4C), esto concuerda con las relaciones de La - Y - Nb,

que indican que estas lavas corresponden a un arco continental calco-alcalino y emergieron a través de una corteza engrosada, características de ambientes con tectónica compresiva (Cabanis and Lecolle, 1989) (ver Figura 4D).

En el diagrama multi-elemental de REE normalizado a condrito de Nakamura (1974), se observa enriquecimiento en tierras raras livianas, con respecto a tierras raras pesadas. También se evidencia anomalías negativas de Eu, estas anomalías son controladas por el fraccionamiento de plagioclasa (ver Figura 4E) (Espinoza et al., 2010). Por otro lado, en el diagrama multi-elemental de REE normalizado a manto primitivo de McDonough and Sun, 1995, se observa fraccionamiento de tierras raras livianas, además de anomalías positivas de Pb, Sr y Ba y anomalías negativas de Eu; estas características son frecuentes en lavas correspondientes a arco continental calco-alcalino (Pearce, 1996) (ver Figura 4F).



**Figura 4.** Geoquímica de la Formación Tarqui. **A.** Diagrama de discriminación litológica de Cox, et al., (1979). **B.** Diagrama de discriminación litológica de Pearce, 1996. **C.** Diagrama de discriminación de afinidad tectónica de Hastie et al., 2007. **D.** Diagrama de discriminación tectónica de Cabanis and Lecolle, 1989. **E.** Diagrama multi-elemental de REE normalizados a condrito de Nakamura, 1974. **F.** Diagrama multi-elemental de REE normalizados a manto primitivo de McDonough and Sun, 1995.

## CONCLUSIONES

En la sección Cañar - Azogues, la Formación Tarqui puede ser discriminada en dos miembros: (1) el Miembro Chaparro que incluye a brechas polimícticas, matriz soportadas, tobas finas con cristales rotos de plagioclasa y tobas gruesas con textura cinerítica. (2) el Miembro Llacao que agrupa tobas finas con líticos riolíticos, limolitas



multicolores con clastos volcánicos y litoareniscas gruesas con estratificación cruzada. El contacto entre los miembros Chaparro y Llaeo es transicional y se observa interestratificación entre estas secuencias. En asociación estos miembros indican ambiente de sedimentación vinculado a planicies fluviales con influencia volcánica activa. En el tope de la Formación Tarqui se observan andesitas y dacitas, las características geoquímicas indican que estas lavas emergieron a través de una corteza continental engrosada en dominio tectónico compresivo.

## REFERENCIAS

- BGS-DINAGE. Informe geoquímico y geocronológico de rocas recolectadas en el área de Cuenca y Nabón entre los años 1989 a 1993, implicaciones para yacimientos de Cu-Au en Loma Blanca. Ministerio de Energía y Recursos Renovables. Ecuador. pp. 55. (1997).
- Cabanis, B., Lecolle, M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en évidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 309, 2023–2029. 1989.
- Chiaradia, M., Fontboté, L., and Beate, B. Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador. *Mineralium Deposita*, 39(2), 204-222 (2004).
- Cox, K. G., Bell, J. D., and Pankhurst, R. J. *The Interpretation of Igneous Rocks*. Allen and Unwin, London, 450 (1979).
- Erazo, M. Apuntes sobre la Geología y estructuras del valle de Cuenca. Cuenca. Anales de la Universidad de Madrid (1957).
- Espinoza, F., Morata, D., Polve, M., Lagabriele, Y., Maury, R. C., de la Rupelle, A., ... & Suárez, M. Middle Miocene calc-alkaline volcanism in Central Patagonia (47 S): petrogenesis and implications for slab dynamics. *Andean geology*, 37(2), 300-328 (2010).
- George, S. W. M. Basin evolution, deformation, and magmatism during variable tectonic regimes in the region linking the central and northern Andes (Doctoral dissertation) (2019).
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A., & Mitchell, S. F. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of petrology*, 48(12), 2341-2357 (2007).
- Hungerbühler, D. *Neogene basins in the Andes of southern Ecuador: evolution, deformation and regional tectonic implications* (Doctoral dissertation, ETH Zurich). Switzerland, 182 pp 1997.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., and Hammer, C. Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1-2), 75-124 (2002).
- Ludwig, K. Geochemical Analysis of the Chinchín Formation in Southern Ecuador. AG colleges. pp. 25 (2019).
- Marocco, R., Lavenu, A., and Baudino, R. Intermontane late Paleogene-Neogene basins of the Andes of Ecuador and Peru: Sedimentologic and tectonic characteristics. *AAPG society*. Chicago, USA. pp. 135 (1995).
- McDonough, W.F., and Sun, S.S. The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223-253 (1995).
- Miall, A. D. Fluvial depositional systems (Vol. 14, p. 316). Cham: *Springer International Publishing*. (2014).
- Nakamura, N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et cosmochimica acta*, 38(5), 757-775 (1974).
- Noblet, C., y Lavenu, A. Geochemical review of Miocene Volcanism in the Ecuadorian Andes. *Geodynamique* 3, 117–138 (1996).

- Pearce, J. A. A user's guide to basalt discrimination diagrams. Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration. *Geological Association of Canada, Short Course Notes*, 12(79), 113 (1996).
- Petit, J. P. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of structural Geology*, 9(5-6), 597-608 (1987).
- Randel, R.P., & Lozada, F. Mapa geológico del Ecuador, hoja de Girón 54, escala 1:100.000. Instituto Geográfico Militar. IGM, Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos. MRNE, Dirección General de Geología y Minas DGGM, Institute of Geological Sciences London IGS (1974).
- Romero, C. W., Calderón D., Rivadeneira M., Calero, M. E. N., Carrillo, M. V. M., & Gramal, A. B. Reconstruyendo el pasado del planeta: El registro estratigráfico y sedimentológico de la Formación Tena en la carretera Tiwintza–Puerto Morona. *Revista Científica GeoLatitud*, 2(2), 2-13 (2019).
- Romero, C. W., Duche, V. L. E., Calderón, D., Gramal, A. B., Menéndez, B. E., Gallardo, O. A., & Velez, T. S. La evolución de abanicos aluviales documentada en el registro estratigráfico de la Formación Tiyuyacu. *Revista Científica GeoLatitud*, 4(1), 38-50 (2021).
- Schütte, P., Chiaradia, M., and Beate, B. Geodynamic controls on Tertiary arc magmatism in Ecuador: Constraints from U–Pb zircon geochronology of Oligocene–Miocene intrusions and regional age distribution trends. *Tectonophysics*, 489(1-4), 159-176 (2010).
- Sengupta, S. Introduction to sedimentology. Routledge (2017).
- Solís-Alulima, B., Corrochano, D., and Reyes, P. Basin-fill development from marine to intermontane settings: Lithostratigraphy, Sedimentology and Paleogeography of the Malacatos-Vilcabamba basin in the southern Ecuadorian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103279 (2021).
- Steinmann, M. The Cuenca basin of southern Ecuador: tectono-sedimentary history and the Tertiary Andean evolution. PhD Thesis, Institute of Geology ETH Zurich, Switzerland, pp 176 1997.
- Steinmann, M., Hungerbühler, D., Seward, D., and Winkler, W. Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 307(3-4), 255-276 (1999).
- Torres J., Romero, C., Carranco, F., & Gramal, A. Litoestratigrafía, petrografía y geoquímica de la unidad Pachicutza en la cordillera del Cóndor. *Revista Científica GeoLatitud*, 4(1), 22-37 (2021).
- UNDP. Survey of metallic and non-metallic minerals. Coal Investigations (Operation No. 1, Cuenca-Biblián and Loja). UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM Technical Report, United Nations Development Program, Quito -New York. (1969).
- Walker, R. G. Facies modeling and sequence stratigraphy: perspective. *Journal of Sedimentary Research*, 60(5) (1990).
- Yu, Q. Y., Bagas, L., Yang, P. H., and Zhang, D., "GeoPyTool: A cross-platform software solution for common geological calculations and plots," *Geoscience Frontiers*, vol. 10, no. 4, pp. 1437-1447, 2019.

# ESTUDIO CUALITATIVO DE PAH'S COMO MARCADORES DE INCENDIO EN HUEVOS DE DAPHNIA DEL EMBALSE SAN ROQUE DE CÓRDOBA

Mario J.A. Ravera<sup>a</sup>, Silvia G. Foray<sup>a</sup>, María F. Mera<sup>a</sup>, Daniel Castellano<sup>a</sup>  
Santiago Salvano<sup>a</sup>, Gustavo Zitto<sup>a</sup>

<sup>a</sup>CEPROCOR, Ministerio de Ciencia y Tecnología de Córdoba, ARGENTINA

e-mail: [Mario.Ravera@cba.gov.ar](mailto:Mario.Ravera@cba.gov.ar) ; [marioravera@gmail.com](mailto:marioravera@gmail.com)

## RESUMEN

*La provincia de Córdoba (Argentina) se encuentra sujeta a eventos recurrentes de incendios que afectan el suelo, aire y agua. Para investigar el impacto que generan estos eventos sobre el ambiente, se realizó este estudio preliminar en áreas afectadas del Valle de Punilla sobre la cuenca del Embalse San Roque. El objetivo fue estudiar la presencia de hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAHs) en huevos de Daphnia que surgieron por afloramientos inusuales en el embalse luego de los incendios. Los estudios fueron realizados mediante cromatografía gas-líquida con detección por espectrometría de masas en tándem (GC/MS-MS), usando patrones estandarizados NIST de PAHs como marcadores químicos de seguimiento post-incendio. Las muestras fueron recolectadas en la superficie del agua, lavadas y secadas a temperatura ambiente. El proceso de extracción de los PAHs se realizó usando 2 alícuotas de 2 ml de cloruro de metileno sobre 0,5 g. de muestra molida en mortero de ágata. El espectrómetro de masas fue configurado en modo SRM optimizando las energías de transición de iones precursores e iones productos para: Naftaleno; 2-Metilnafataleno; 1-Metilnaftaleno; Acenaftileno; Acenafteno; Fluoreno; Fenantreno; Antraceno; Fluoranteno; Pireno; Benzo(a)Antraceno; Criseno; Benzo(b)Fluoranteno; Benzo(k)Fluoranteno; Benzo(a)Pireno; Indeno(1,2,3-cd)Pireno; Benzo(a,h)Antraceno; Benzo(g,h,i)Perileno. En las muestras analizadas se identificaron y confirmaron los 18 marcadores de PAHs. Esto puede deberse al contenido lipídico de los huevos lo cual, los define como óptima matriz de estudio para investigar la presencia de PAHs en agua. Se postula que, durante los incendios, los PAHs son transportados en el material particulado del humo y depositados en zonas periféricas como la cuenca del embalse San Roque. Además, la afectación del ciclo reproductivo de las Daphnias y la producción de huevos de resistencia, puede ser una consecuencia de los cambios ambientales ocurridos por los incendios.*

Palabras Clave: Incendios, PAHs, *Daphnia*, GC-MSMS., Ambiente.

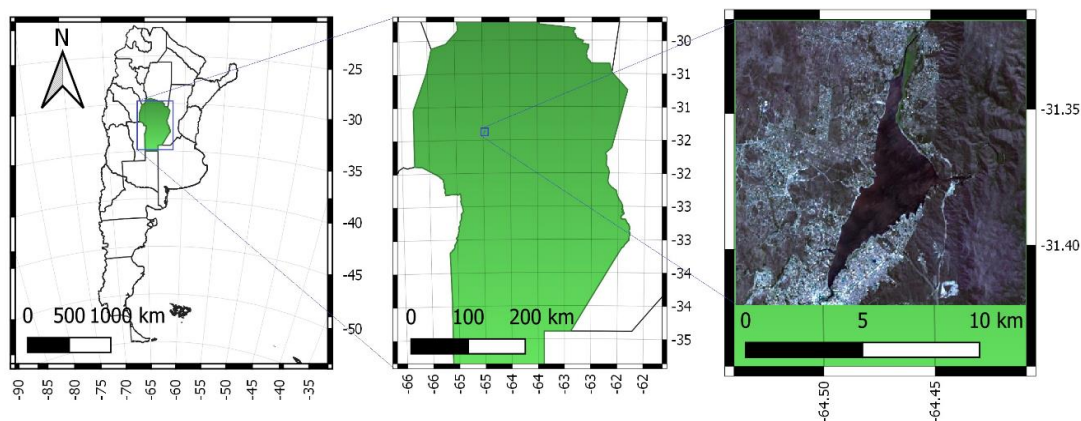
## ABSTRACT

*The province of Córdoba (Argentina) is subject to recurring fire events that affect the soil, air and water. To investigate the impact that these events generate on the environment, this preliminary study was carried out in affected areas of the Punilla Valley on the San Roque reservoir basin. The objective was to study the presence of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH's) in Daphnia eggs that arose from unusual outcrops in the reservoir after the fires. The studies were carried out by gas-liquid chromatography with detection by tandem mass spectrometry (GC / MS-MS), using standardized NIST standards of PAHs as post-fire follow-up chemical markers. The samples were collected on the surface of the water, washed and dried at room temperature. The PAHs extraction process was carried out using 2 aliquots of 2 ml of methylene chloride over 0.5 g. sample ground in agate mortar. The mass spectrometer was configured in SRM mode optimizing the transition energies of precursor ions and product ions for: Naphthalene; 2-Methylnaphthalene; 1-Methylnaphthalene; Acenaphthylene; Acenaphthene; Fluorene; Phenanthrene; Anthracene; Fluoranthene; Pyrene; Benzo (a) Anthracene; Criseno; Benzo (b) Fluoranthene; Benzo (k) Fluoranthene; Benzo (a) Pyrene; Indene (1,2,3-cd) Pyrene; Benzo (a, h) Anthracene; Benzo (g, h, i) Perylene. In the analyzed samples, the 18 PAH markers were identified and confirmed. This may be due to the lipid content of the eggs, which defines them as the optimal study matrix to investigate the presence of PAHs in water. It is postulated that during fires, PAHs are transported in the particulate matter of the smoke and deposited in peripheral areas such as the San Roque reservoir basin. In addition, the affectation of the reproductive cycle of Daphnias and the production of resistance eggs may be a consequence of the environmental changes caused by the fires.*

Key Words: Fire, PAHs, Daphnia, GC-MSMS., Environment.

## INTRODUCCIÓN

El embalse San Roque se encuentra en el valle de Punilla, Córdoba, Argentina, a una altura promedio de 650 metros sobre el nivel del mar y recibe el aporte de agua de cuatro tributarios: los ríos Cosquín y San Antonio y los arroyos Las Mojarras y Los Chorillos (Fig. 1). El área de la cuenca es de 1750 km<sup>2</sup> con precipitaciones medias anuales de 750 mm y oscilaciones de temperatura que abarcan un rango de más de 40°C.



**Figura 1.** Embalse San Roque, Córdoba, Argentina. Escena Landsat 8 (5/11/2017)

En el embalse San Roque se desarrollan una gran variedad de especies de fitoplancton y zooplancton que en determinadas épocas del año (dependiendo de la disponibilidad de nutrientes, temperatura, luz y oxígeno) tienen afloramientos y picos de producción que a veces son observables a simple vista, como, por ejemplo, el cambio de color del agua o presencia de elementos en suspensión.

De hecho, lo que motivó el presente estudio fue la presencia inusual de una gran cantidad de particulado en suspensión en la superficie del agua, de color amarillado (semejante a cenizas o al derrame de algún producto sólido en el embalse), razón por la cual se dispuso la recolección de muestras de agua superficial con el objetivo de identificar el origen del sólido en suspensión y realizar un análisis tanto multielemental como de componentes orgánicos (Fig. 2, 3 y 4).

La cuenca del embalse San Roque ha sido escenario de numerosos incendios forestales en las últimas décadas. La combustión incompleta del material vegetal de estos bosques da lugar a la formación de carbón y otros compuestos orgánicos como hidrocarburos lineales o alcanos, hidrocarburos aromáticos polinucleares (HAP) y productos intermediarios del proceso de combustión. Los HAP son un grupo muy extenso de sustancias formadas por fusión de anillos aromáticos que se encuentran incluidos en el listado de sustancias contaminantes (Manciulea L., Dumitrescu L., 2018; Neff J.M. et al, 2005).

El perfil de hidrocarburos poliaromáticos formados por combustión depende de las temperaturas que se alcanzan en este proceso y el material ignífugo, por lo que son considerados marcadores químicos de combustión. Existen estudios que demuestran que la formación de algunos HAP particulares pueden favorecerse a partir de metabolitos secundarios de las especies forestales predominantes. Los HAP se forman conjuntamente

con carbón donde quedan adsorbidos y ocluidos (Manciulea L., Dumitrescu L, 2018; Leroy-Cancellieri V. et al, 2021; Myers-Pigg A.N. et al, 2017).

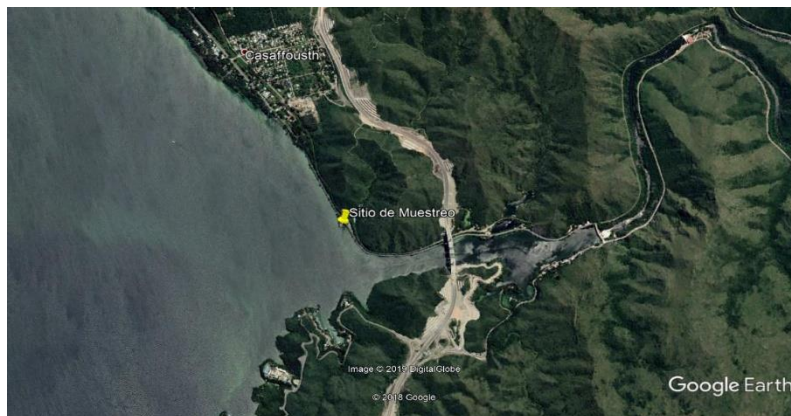
Además, tienen una gran afinidad para interactuar con materia orgánica donde quedan retenidos y/o con la que son transportados. De acuerdo a sus PM, volatilidad e hidrofobicidad se distribuyen y transportan de diferentes modos (Manciulea L., Dumitrescu L, 2018; Bigus et al, 2013; Syed J.H et al, 2017).

Distintos investigadores han propuesto relaciones de HAP entre especies definidas como marcadoras de combustión petrogénica y otras pirogénicas y se han establecido criterios para identificar la fuente (Manciulea L., Dumitrescu L, 2018; Chen et al, 2012; Syed J.H. et al, 2017; Li Q. et al, 2018).

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Área de estudio y recolección de muestras

Las muestras de agua superficial con particulado en suspensión fueron recolectadas en la costa del embalse aledaña a la Comuna San Roque (Fig. 2, 3 y 4).



**Figura 2.** Imagen del área de estudio y sitio de muestreo



**Figura 3.** Imagen del área de estudio y sitio de muestreo (costa de Comuna San Roque)



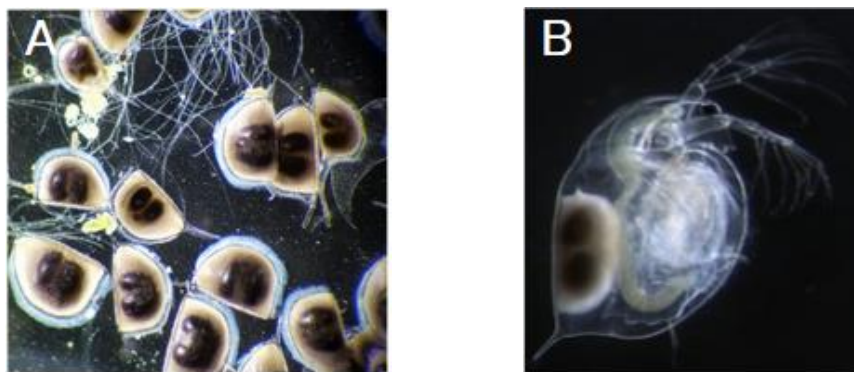
**Figura 4.** Imagen del particulado en suspensión observado en el sitio de muestreo (costa de Comuna San Roque)

### Identificación de las muestras

Las muestras recolectadas fueron transportadas al laboratorio y se procedió al filtrado de las mismas (empleando embudo con papel de filtro) para separar el material particulado. Posteriormente, se realizó la observación del material particulado empleando una lupa (10X).

De acuerdo a las características morfológicas observadas, se identificó la presencia de huevos de dafnia (Fig. 5a).

En la Fig. 5b se presenta una imagen de dafnia hembra adulta en la que puede observarse la presencia de huevos en su interior (Universitam, 2019).



**Figura 5.** **A:** Imagen óptica del particulado (10X). **B:** Daphnia Hembra adulta con huevos

### Información sobre dafnias y producción de huevos de resistencia

*Daphnia magna* es una especie perteneciente a la familia *Daphnidae*, incluida en la clase *Crustacea*, subclase *Branchiopoda*, orden *Diplostraca*, suborden *Cladocera* (Sanchez

Martinez, 2016; Universitam 2019). El nombre común es dafnia y también se las conoce vulgarmente como “pulga de agua” debido al tamaño pequeño y a la forma de moverse como “saltando”. El tamaño de las dafnias varía entre 0,2 y 2,0 mm de longitud y está estrechamente relacionado con la disponibilidad de alimento en el medio. Habitan en ambientes dulceacuícolas como charcos, lagos y ríos. Se alimentan principalmente de fitoplancton, microorganismos (protistas y bacterias) y materia orgánica (particulada o disuelta). En el ciclo reproductivo de los dáfnidos se distinguen dos tipos de reproducción con alternancia de generaciones: partenogénesis y sexual. Los dáfnidos se reproducen por partenogénesis habitualmente desde la primavera hasta el final del verano. Cuando los recursos alimenticios son abundantes en el medio y la densidad poblacional es baja, las hembras producen huevos diploides que se desarrollan en la cámara dorsal de la incubación (Sanchez Martinez, 2016; Universitam 2019).

Durante la mayor parte del año, las poblaciones están integradas casi exclusivamente por hembras. En invierno, en caso de sequía o cuando el ecosistema se vuelve nocivo, la producción de generaciones de hembras cesa y comienza la aparición de machos. Los machos son de menor tamaño que las hembras y tienen un apéndice abdominal especializado que es usado en el apareamiento para insertar en la hembra la espermateca y fertilizar los huevos. La aparición de machos se asocia a la existencia de determinadas condiciones ambientales adversas como elevada densidad poblacional, acúmulo de productos de excreción, deficiencia de recursos alimenticios, bajo contenido de oxígeno en el medio y temperaturas extremas (Sanchez Martinez, 2016).

Estas condiciones inducen a la aparición de huevos de resistencia, fruto de la reproducción sexual; estos, se caracterizan por estar cubiertos por una capa extra, rica en queratina, que los preserva y protege de la luz ultravioleta (UV), la desecación, los parásitos y la ingestión por organismos mayores hasta que el ambiente sea favorable nuevamente. Cuando las condiciones ambientales favorables se restablecen, los huevos de resistencia eclosionan liberando hembras que restituyen la reproducción partenogenética en la población (Sanchez Martinez, 2016).

## **Tratamiento de la muestra y metodología empleada**

El material colectado, fue lavado con agua desionizada (calidad inyectable) y secado a temperatura ambiente. El proceso de extracción de los HAPs se realizó usando 2 alícuotas de 2 ml de cloruro de metileno (grado cromatográfico, Merck) sobre 0,5 g. de muestra molida en mortero de ágata.

Se tomó una alícuota de 1 ml del extracto y se procedió al análisis por cromatografía gaseosa usando como detector un espectrómetro de masas/masas definiendo dos modos de análisis de iones: Scan y SRM ambos a 70 eV de energía de ionización y a 50 uA de corriente de emisión de electrones.

El estudio se realizó con un cromatógrafo de gas-líquido Trace 1310 Thermo Scientific con un espectrómetro de masas triple cuadrupolo TSQ 800 Evo de Thermo Scientific; empleando como material de referencia una mezcla de 18 de Hidrocarburos Aromáticos



Polinucleares (mix 2000 ppm, marca Supelco, Sigma-Aldrich) para el desarrollo del método cromatográfico y de detección por SRM.

Las condiciones cromatográficas empleadas fueron: Columna: TG-5SILMS (30m x 0,25mm x 0,25µm). Inyector: Temperatura 300°C en modo *Splitless*; flujo constante por columna de 1 ml/min; flujo purga de septum 8 ml/min; gas carrier Helio; volumen de inyección de muestra 3µL Horno: Temperatura inicial 40°C (tiempo de permanencia 0 min). Rampa 1: 6°C/min a 200°C (tiempo de permanencia 0 min). Rampa 2: 1°C/min a 210°C (tiempo de permanencia 0 min). Rampa 3: 2,5°C/min a 270°C (tiempo de permanencia 4 min). Rampa 4: 20°C/min a 285°C (tiempo de permanencia 4 min).

Las condiciones para detección en Espectrómetro de Masas TSQ 800 Evo Thermo Scientific, fueron: Modo Scan: Ionización por impacto de electrones a 70 eV; polaridad positiva, tiempo de escaneo (*window*) 0,5 min., corriente de emisión de electrones de 50 µA; temperatura de transferencia de línea 270°C; temperatura fuente de ionización 250°C. Rango de masas escaneadas 50 a 450 uma.

Modo SRM: Ionización por impacto de electrones a 70 eV; polaridad positiva, tiempo de escaneo (*window*) 0,5 min., corriente de emisión de electrones de 50 µA; temperatura de transferencia de línea 270°C; temperatura fuente de ionización 250°C. Las energías de colisión y masas de iones seleccionados para los PAH's se definen en la Tabla I. y en Fig. 7 se presentan las estructuras moleculares de los principales PAHs

**Tabla I.** Masas de iones seleccionados para PAH's y energías de colisión (eV)

PAH's	RT	Masa (uma)	Producto de masa (uma)	Energía de colisión (eV)	Ión: modo sim (uma)
Naftaleno	11,136	128,1	127,1	15	128
2-Metilnaftaleno	13,698	142,1	141,1	15	142
1-Metilnaftaleno	14	142,1	141,1	15	142
Acenaftileno	16,991	153,1	152,1	15	152
Acenafteno	17,685	153,1	152,1	20	153
Fluoreno	19,687	165,1	164,1	15	165
Fenantreno	23,306	178,1	177,1	15	178
Antraceno	23,504	178,1	177,1	15	178
Fluoranteno	27,987	202,1	201,1	20	202
Pireno	28,977	202,1	201,1	20	202
Benzo(a)antraceno	37,907	226,1	224,1	35	226
Benzo(a)antraceno	37,907	228,1	227,2	15	228
Criseno	38,192	226,1	224,1	30	226
Criseno	38,192	228,1	227,2	15	228
Benzo(b)fluoranteno	47,357	250,1	249,2	20	250
Benzo(b)fluoranteno	47,357	252,1	251,3	15	252
Benzo(k)fluoranteno	47,599	250,1	249,0	20	250
Benzo(k)fluoranteno	47,599	252,1	251,1	15	252
Benzo(a)pireno	49,755	250,1	249,2	20	250
Benzo(a)pireno	49,755	252,1	251,2	15	252
Indeno(1,2,3-cd)pireno	57,918	274,1	272,1	35	274
Indeno(1,2,3-cd)pireno	57,918	276,1	275,1	20	276
Dibenzo(a,h)antraceno	58,424	276,1	275,1	15	276
Dibenzo(a,h)antraceno	58,424	278,1	277,3	15	278
Benzo(g,h,i)perileno	59,35	274,1	273,1	25	274
Benzo(g,h,i)perileno	59,35	276,1	275,1	20	276

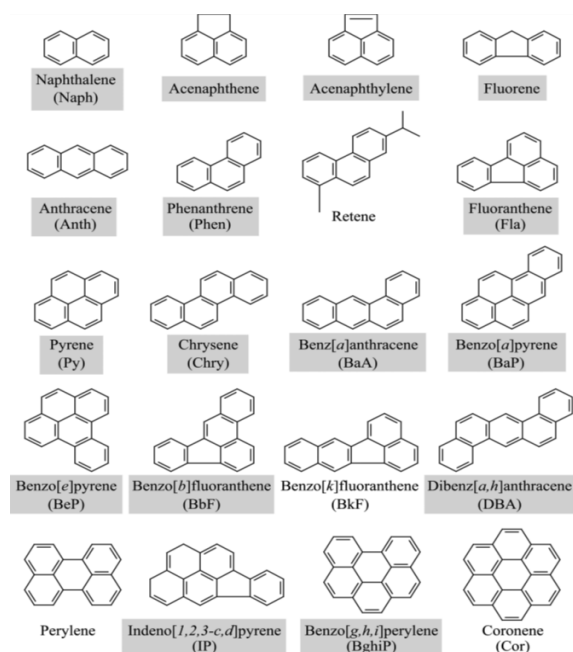


Figura 7. Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares como marcadores de incendio

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta en la Fig.6, el cromatograma de la fracción extraída con cloruro de metileno analizada en modo scan y en la Tabla II quedan definidos los componentes orgánicos mayoritarios identificados en banco de datos NIST *Search* (NIST, 2014) con sus pesos moleculares (PM), tiempo de retención en minutos (TR) y su correspondiente número de CAS (*Chemical Abstract Service*) para su identificación internacional.

C:\Xcaibou... \ExtrachuevosDaphnia

10/04/18 12:51:34

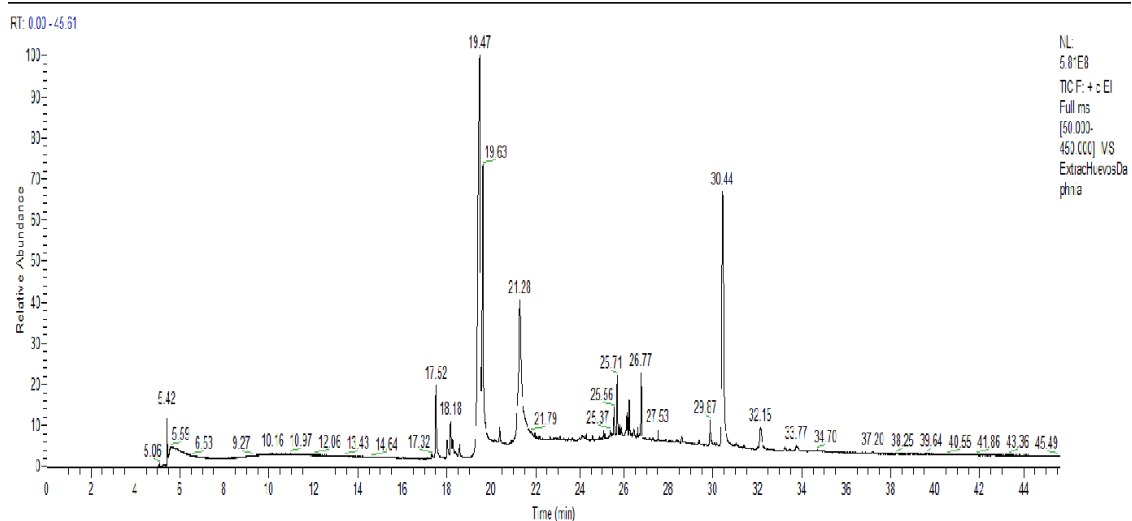


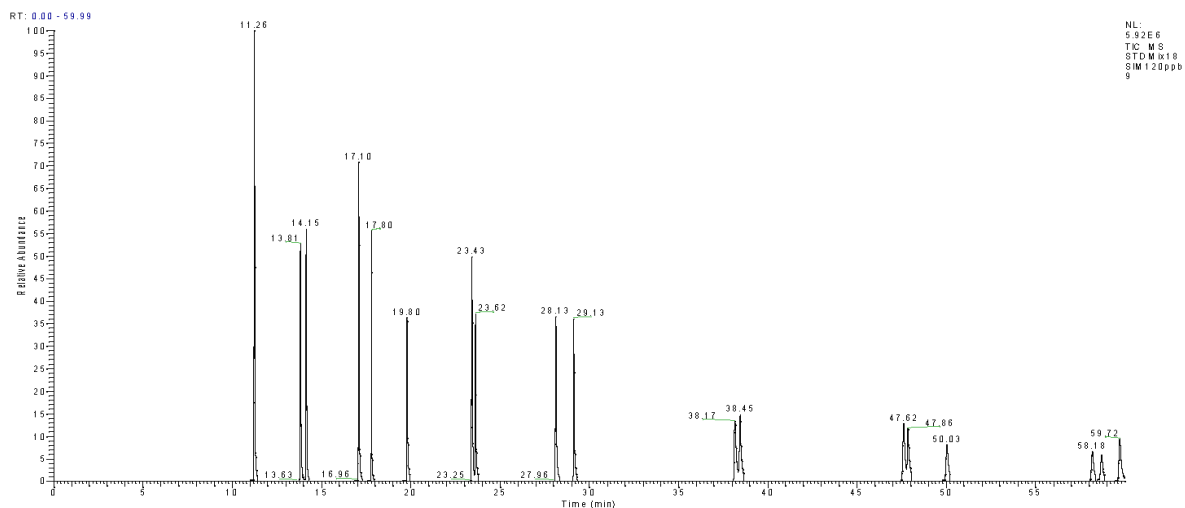
Figura 6. Cromatograma de componentes orgánicos en huevos de dafnia

**Tabla II:** Componentes orgánicos mayoritarios en los huevos de dafnia

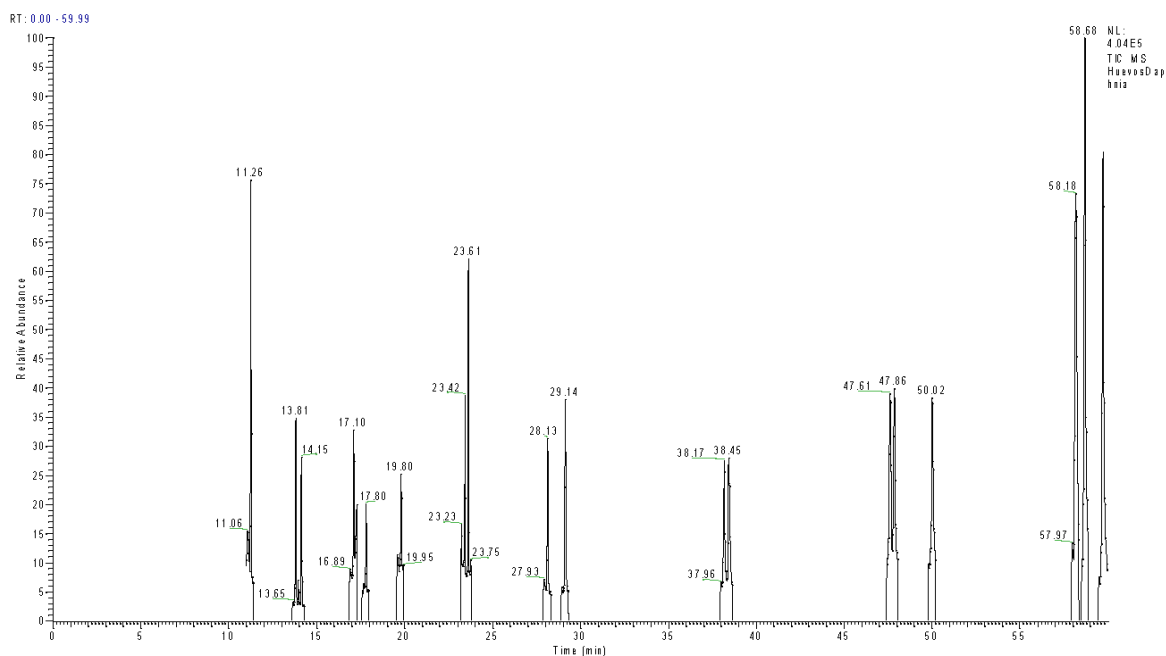
Nombre	PM	TR (min)	CAS#
<b>Tetradecanoic acid</b>	228	17,48 – 17,56	544-63-8
<b>Cylopentadecanone</b>	240	17,99 – 18,05	4727-18-8
<b>Pentadecanoic acid</b>	242	18,15 – 18,22	1002-84-2
<b>Palmitoleic acid</b>	254	19,29 – 19,54	373-49-9
<b>Ascorbic acid 2,6-dihexadecanoate</b>	652	19,54 – 19,67	28474-90-0
<b>Arachidonic acid</b>	304	20,35 – 20,39	506-32-1
<b>Cis-Vaccenic acid</b>	282	21,26 – 21,35	506-17-2
<b>Behenyl chloride</b>	344	25,03 – 25,07	42217-03-8
<b>Tetracosane</b>	338	25,79 – 25,82	646-31-1
<b>Squalene</b>	410	26,70 – 26,73	111-024
<b>Tetraatriacontane</b>	478	27,51 – 27,55	14167-59-0
<b>Desmosterol</b>	384	29,85 – 29,91	313-04-2
<b>Cholesterol</b>	386	30,36 – 30,54	57-88-5
<b>Campesterol</b>	400	32,10 – 32,19	474-62-4
<b>Sitosterol</b>	414	33,69 – 33,83	83-47-6

En una primera etapa se desarrolló la metodología analítica cromatográfica, logrando una correcta separación de los 18 PAH's (estándar Mix NIST) caracterizados cada uno de ellos por sus tiempos de retención (TR) (Fig. 8 y Tabla I).

Posteriormente, se optimizaron las energías de colisión en el segundo cuadrupolo para maximizar los niveles de sensibilidad y detección. Dichas energías están detalladas en la Tabla I y el análisis cromatográfico en modo SRM del material extraído de los huevos de dafnia (Fig. 9).



**Figura 8.** Cromatograma en modo SIM de los 18 PAH's caracterizados por sus TR



**Figura 9.** Análisis cromatográfico modo SRM material extraído de huevos de dafnia

## CONCLUSIONES

Los huevos de dafnias contienen macronutrientes y micronutrientes que estos organismos obtienen del entorno y puede considerarse que son un reflejo de la composición del medio

en donde crecen y se desarrollan, ya que pueden concentrar contaminantes del agua y bioacumularlos.

Desde el punto de vista de componentes orgánicos se logró la caracterización de los mayoritarios que conforman la matriz nutricional para que estos organismos se desarrollen. Este estudio fue desarrollado con el modo más simple en espectrometría de masas: modo Scan, definiendo los huevos de dafnia como una matriz lipídica rica en ácidos grasos C16 y C18.

Aplicando técnicas analíticas más sensibles de espectrometría de masas sobre el material extraído de los huevos de dafnia, por ejemplo, SRM, se identificaron y confirmaron los 18 PAH's con una marcada intensidad de los de alto peso molecular.

La presencia de los PAH's en los huevos de dafnia puede deberse al contenido lipídico de estos que actúa como sitio de bioacumulación. Los huevos constituyen una matriz óptima para estudiar los PAH's y otros compuestos de polaridad similar en agua.

Se postula que, durante los incendios, los PAH's son transportados en el material particulado del humo y depositados en zonas periféricas, como lo es la cuenca del embalse San Roque. En este medio las dafnias los incorporarían por la gran cantidad de agua que filtran.

La afectación del ciclo reproductivo de las dafnias y la producción de huevos de resistencia, podría ser una consecuencia de los cambios ambientales como los ocurridos por los incendios que afectan a vastas extensiones de suelo.

La importancia de estos invertebrados en el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos ha sido vital para que fueran escogidos como organismos bioindicadores en los test de toxicidad. Dentro de los cladóceros, el género *Daphnia* se encuentra entre los consumidores dominantes de los productores primarios de las aguas dulces. Se distribuye tanto en lagos oligotróficos como eutróficos y constituye un importante reservorio alimenticio tanto para otros invertebrados como para los predadores vertebrados como los peces (Sanchez Martínez, 2016).

El estudio temporal de las dafnias como de sus huevos representan una óptima matriz para el seguimiento de marcadores de contaminación ambiental.

## REFERENCIAS

- Kim, E. J., Choi, S.-D. & Chang, Y.-S.(2011) Levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils after forest fires in South Korea. *Environmental Science and Pollution Research* 18(9), 1508–1517, doi:10.1007/s11356-011-0515-3.
- Leroy-Cancellieri, V., Cancellieri D., Leoni E.; 2021. Characterization of PAHs Trapped in the Soot from the Combustion of Various Mediterranean Species Atmosphere 12, no. 8: 965. <https://doi.org/10.3390/atmos12080965>

- Li Q, Wu J, Zhao Z (2018) Spatial and temporal distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in sediments from Poyang Lake, China. PLOS ONE 13(10): e0205484. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205484>
- Manciulea L., Dumitrescu L, (2018) Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs) Learning Toxicology Through Open Educational. Universitatea Transilvania din Brasov Rumania. TOXOER Erasmus+ Disponible en [http://moodle.toxoer.com/pluginfile.php/3553/mod\\_page/content/1/U5\\_PAH%20SPA.pdf](http://moodle.toxoer.com/pluginfile.php/3553/mod_page/content/1/U5_PAH%20SPA.pdf) , acceso noviembre 2021.
- Myers-Pigg AN, Louchouart P., Teisserenc R (2017) Flux of Dissolved and Particulate Low-Temperature Pyrogenic Carbon from Two High-Latitude Rivers across the Spring Freshet Hydrograph. Front. Mar. Sci. 4:38. doi: 10.3389/fmars.2017.00038
- Neff J.M, Stout S.A., Gunster D.G., (2005) Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments: Identifying Sources and Ecological Hazard Integrated Environmental Assessment and Management — Volume 1, Number 1—pp.22–33 SETAC
- NIST (2014) Mass Spectral Library 1R120383-2014 Rev. A.
- Sanchez Martínez M., (2016). Alteraciones fisiológicas como consecuencia de la exposición a plaguicidas en sucesivas generaciones de *Daphnia magna*, Universitat de València, Servei de Publicacions, ISBN:84-370-6488-0, 2006, España.
- Syed J.H., Iqbal M, Shong G, Katsoyiannis A., Yadav I.Ch., Li J. Zhang G. (2017) Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Chinese forest soils: profile composition, spatial variations and source apportionment Scientific Reports | 7: 2692 | DOI:10.1038/s41598-017-02999-0 10.
- Universitam (2019) Universidad de Méjico, página de internet disponible en <https://universitam.com/academicos>, acceso noviembre 2021.

# EL ROL DE LA TEMPERATURA DEL SUELO EN LOS AMBIENTES DE MONTAÑA

Agustina Reato<sup>a</sup>, Oscar A. Martínez<sup>b</sup>, Eleonora S. Carol<sup>c</sup>

<sup>a</sup>CIEMEP (CONICET – UNPSJB) Roca 780, CP: 9200, Esquel, Argentina.

<sup>b</sup>Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Sede Esquel, Argentina

<sup>c</sup>Centro de Investigaciones Geológicas (CIG), Universidad Nacional de La Plata - CONICET, Calle Diagonal 113

e-mail: [agustinareato@comahue-conicet.gob.ar](mailto:agustinareato@comahue-conicet.gob.ar)

## RESUMEN

*La temperatura del suelo en geoformas de altura es una variable que influye directamente en la conservación de agua en estado sólido. En la región oriental de la cordillera nordpatagónica del Chubut existen, por encima de la cota de 1600 m.s.n.m., un gran número de geoformas depositacionales de origen glacial y periglacial, donde no hay hielo glacial y la presencia de permafrost está limitada o ausente. En el presente trabajo se analizan los datos de la temperatura del suelo tomados entre marzo del 2017 y marzo del 2018 en los cerros Nahuel Pan y La Hoya, dos de los picos más elevados cercanos a la localidad de Esquel. Se colocaron sensores de temperatura a 50 cm de profundidad en geoformas vinculadas a manantiales y cursos de agua permanentes. En La Hoya fueron localizados en un glaciar de roca inactivo (2030 m.s.n.m.) y en una terraza de soliflucción (1870 m.s.n.m.). En el cerro Nahuel Pan se colocaron en un glaciar de roca fósil (1780 m.s.n.m) y en un lóbulo de soliflucción (1680 m.s.n.m.). Se utilizaron además datos de precipitación y temperatura obtenidos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Esquel (SMN), datos de profundidad de la nieve procesados desde Climate Engine y se analizaron imágenes satelitales Landsat 8. Los resultados obtenidos demuestran que, para fines del invierno, la temperatura promedio del aire supera los 0°C, favoreciendo el derretimiento de la nieve superficial. Las temperaturas del suelo cercanas o por debajo de 0°C favorecen la conservación de agua en estado sólido desde mediados del invierno hasta el inicio de la época estival. La temperatura del suelo en geoformas periglaciales con permafrost muy limitado o ausente es una variable muy sensible en la regulación del escurrimiento de agua y su comportamiento resulta de trascendental importancia en regiones con déficit hídrico.*

*Palabras Clave:* Ambiente periglacial, Hielo estacional, Unidades morfosedimentarias, Regulación hídrica)

## INTRODUCCIÓN

La temperatura del suelo en ambientes de montaña tiene un rol muy relevante en los procesos periglaciales de hielo y deshielo. Factores como la temperatura del aire, el contenido orgánico del suelo y la cobertura nival afectan la temperatura del suelo, siendo este último el que más influyente en el comportamiento de la temperatura subsuperficial (Edwards *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2021) y el que ha sido más ampliamente estudiado (Sherstiukov and Anisimov, 2018; Goncharova *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021). Por su parte, la influencia que tiene la temperatura subsuperficial del suelo en la dinámica hidrológica de geoformas de altura, sin permafrost, no suele ser objetivo de análisis.

El área de estudio del presente trabajo se ubica en la Cordillera Nord Patagónica (CNP) de Chubut, en los cerros Nahuel Pan y La Hoya (ver Fig. 1). En el interior de valles y circos glaciales desarrollados en éstos cordones montañosos se confirmó un gran número de unidades morfosedimentarias glaciales relictas y periglaciales relictas y activas (Reato et al., 2017; Martínez et al., 2017; Reato, 2020) en donde se destacan glaciares de roca (Reato, 2020; Reato et al., 2021). Por otro lado, en las inmediaciones del área estudiada, en base a análisis estadísticos, se ha indicado la presencia probable de permafrost entre los 1750 y los 2100 m.s.n.m (Ruiz y Trombotto, 2012) en los cordones Esquel, Leleque y Rivadavia, sin que esto se haya verificado mediante los correspondientes controles de campo.

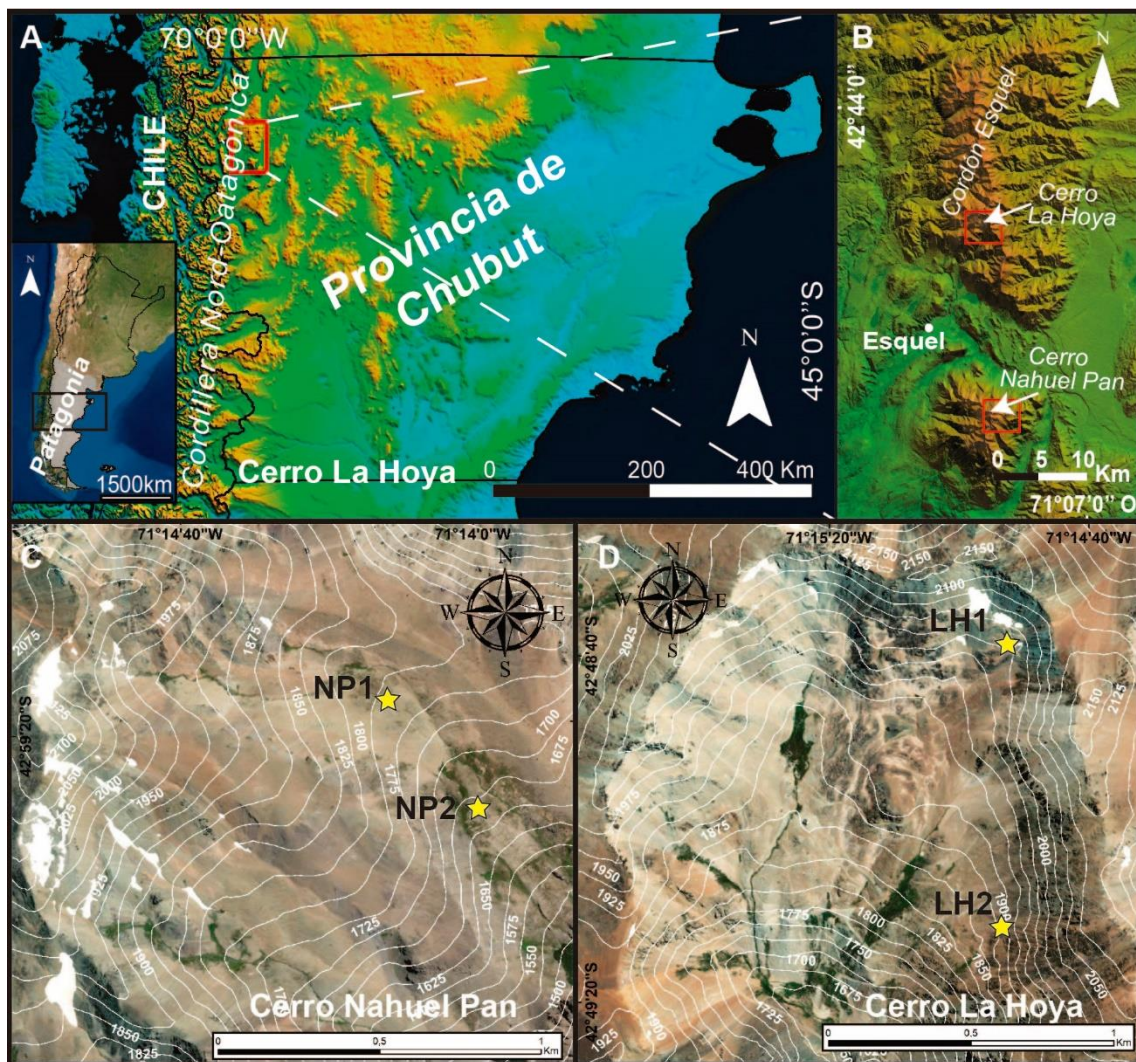


Figura 1. A) Ubicación del área de estudio. B) los Cerros La Hoya y Nahuel Pan, al norte y sur de la localidad de Esquel, respectivamente. C) y D) localización de los sensores de temperatura.

Estudios recientes en el área de estudio han dado cuenta de la importancia que tienen las geoformas de altura, especialmente las geoformas fósiles que sirven como reservorios de agua, (glaciares de roca, lóbulos de soliflucción, protalus ramparts, y otras geoformas depositacionales relacionadas) en el comportamiento hidrológico y en el mantenimiento



de mallines de altura en la zona montañosa (Reato *et al.*, 2021, 2022). Esta región se encuentra en una zona de transición climática en la cual las precipitaciones anuales varían entre los 1200 mm al oeste y 400 mm hacia el este de los cordones montañosos estudiados (Coronato *et al.*, 2017). El aporte de agua subterránea que escurre desde las unidades morfosedimentarias de altura, ha sido registrado como el principal aporte hídrico durante las estaciones más secas en la cuenca alta del Cerro La Hoya, garantizando el régimen permanente del Arroyo Bandidos, el cual suministra el agua para consumo humano de la localidad de Esquel (Reato *et al.*, 2022). Si bien estas geoformas depositacionales de altura son cruciales en el almacenamiento y gradual liberación de agua, no constituyen la única variable que favorece la conservación de agua en los meses de mayor sequía en ésta región. El comportamiento de la temperatura subsuperficial del suelo es otro factor relevante y, por ello es analizado en detalle en el presente trabajo.

## MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Durante los años 2017 y 2018 fueron colocados cuatro sensores de temperatura, a 50 cm de profundidad, en geoformas depositacionales de altura vinculadas a manantiales y cursos de agua permanentes. En el cerro La Hoya fueron colocados en una terraza de solifluxión (LH2, 1870 m.s.n.m., ver Fig. 2) y en un glaciar de roca (LH1, 2030 m.s.n.m., ver Fig. 2) considerado inactivo/fósil según sus atributos geomorfológicos, sin que se haya reconocido la presencia de permafrost (Reato, 2020; Reato *et al.*, 2021). En el cerro Nahuel Pan, por su parte, se colocaron en un lóbulo de solifluxión (NP2, 1680 m.s.n.m., ver Fig. 2) y en un glaciar de roca (NP1, 1780 m.s.n.m., Fig. 2) considerado fósil según sus atributos geomorfológicos (Reato, 2020). Los sensores registraron la temperatura cada 4 horas en cada uno de los puntos mencionados, generando una curva de temperaturas muy completa, con 6 datos diarios. Para comparar los datos de la temperatura del suelo con las condiciones climáticas de la región se utilizaron datos de precipitación y temperatura obtenidos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Esquel (SMN), la más cercana al área de estudio. Debido a la falta de estaciones meteorológicas en los cerros analizados, se obtuvieron datos de profundidad de la nieve del Sistema Global de Asimilación de Datos sobre la Tierra (GLDAS por sus siglas en inglés, Rodell *et al.*, 2004), extraídos, ya procesados, desde la plataforma Climate Engine (<http://climateengine.org/app>; Huntington *et al.*, 2017; Climate Engine, 2021). El sistema GLDAS incorpora productos satelitales y datos obtenidos en el terreno para generar modelos de superficie terrestre. Si bien los datos obtenidos suelen subestimar la cantidad de nieve realmente precipitada (Broxton *et al.*, 2016), ésta variable, junto con el análisis de imágenes satelitales Landsat 8 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), con una combinación de bandas RGB 432, proporcionaron una idea general del comportamiento de la cobertura de nieve durante el 2017 y 2018 en los cerros estudiados.

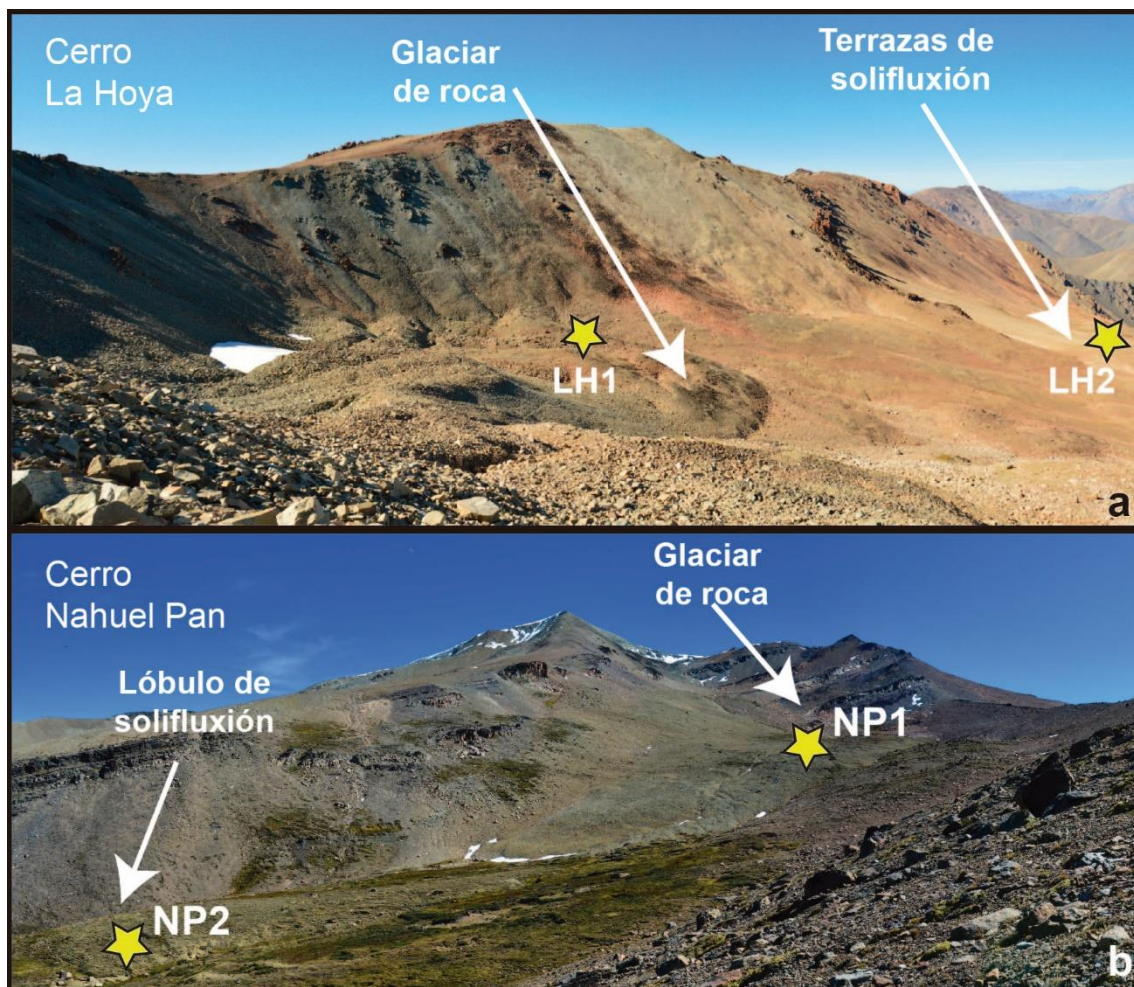


Figura 2. Ubicación de los sensores de temperatura del suelo en los cerros a) La Hoya y b) Nahuel Pan.

## RESULTADOS

### Condiciones climáticas regionales:

En base a los datos climáticos registrados por la estación meteorológica Esquel, las observaciones de campo efectuadas, y la información extraída de GLDAS y las imágenes satelitales analizadas se definió el comportamiento climático anual de los Cerros La Hoya y Nahuel Pan. El análisis del diagrama de precipitaciones y temperaturas permitió identificar para el área de estudio, periodos de sequía durante los meses de verano, donde las precipitaciones son prácticamente nulas coincidiendo con el registro de mayores temperaturas, y periodos de humedad durante los meses de invierno, donde se concentran las precipitaciones y el registro de las temperaturas marca los valores más bajos (Ver Fig. 3). Durante el 2017 las precipitaciones se concentraron entre los meses de mayo y agosto, con escasos días con precipitaciones durante octubre y diciembre. En el área montañosa, las precipitaciones ocurrieron en forma de nieve, donde la cobertura nival mantuvo su máxima extensión hasta inicios de septiembre (ver Figs. 3 y 4), reduciéndose considerablemente para los meses de octubre y noviembre del

2017, desapareciendo casi por completo a partir de diciembre del 2017, estando ausente completamente, incluso en sectores de baja exposición solar, durante los meses de enero y febrero del 2018 (ver Figs. 3 y 4).

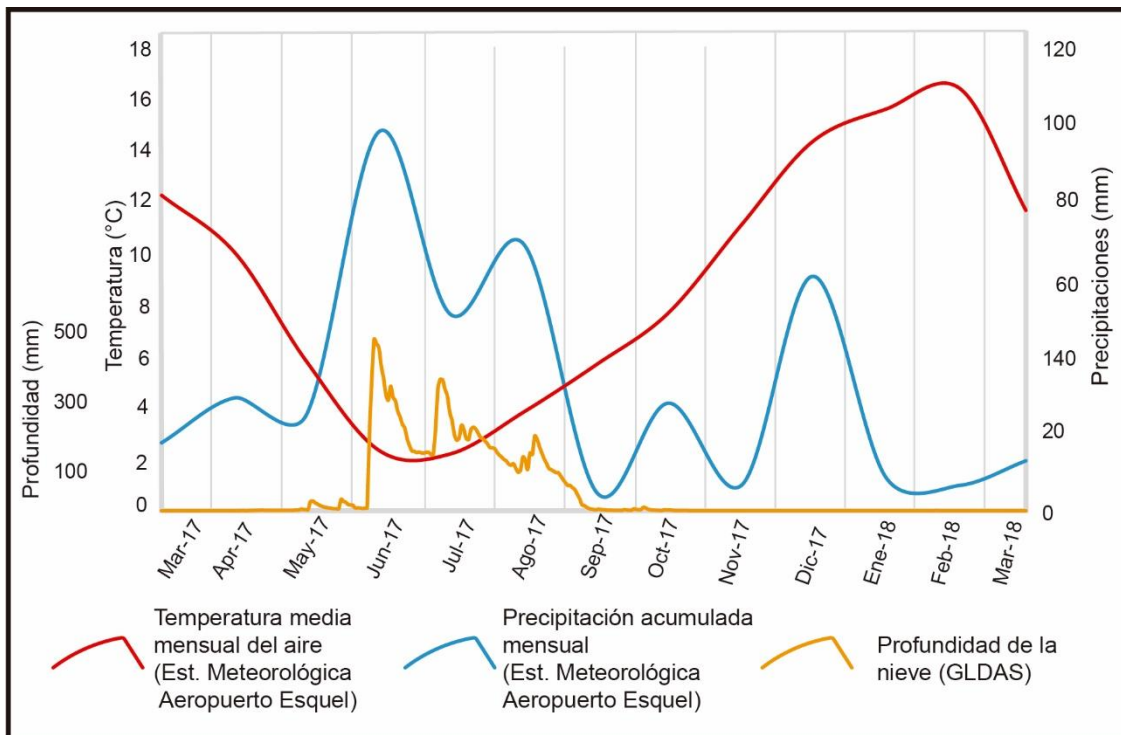


Figura 3. Registros de precipitaciones y temperaturas obtenidos de la estación meteorológica del Aeropuerto Esquel y profundidad de nieve estimada por el software GLDAS durante el periodo marzo del 2017 a marzo del 2018.

Las temperaturas del aire fueron mínimas durante finales de junio y principios de julio del 2017, coincidiendo con las mayores precipitaciones, cuando la temperatura promedio se mantuvo en 2,5°C (ver Fig. 3). Desde mediados de octubre del 2017 hasta mediados de diciembre del 2017 se registró un marcado aumento de la temperatura, que continuó con un aumento más gradual durante los meses siguientes, hasta alcanzar las temperaturas máximas en el mes de febrero del 2018 (ver Fig. 3).

### Temperaturas del suelo:

El análisis de la temperatura del suelo mostró un patrón general similar en todos los sensores, registrándose las mayores temperaturas en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, mientras que las menores temperaturas se registraron en el periodo de junio a noviembre. El comportamiento de la temperatura media diaria del suelo evidenció, al igual que la temperatura media diaria del aire, variaciones importantes en pocos días de registro (ver Fig. 5a). Sin embargo, estas variaciones, representadas en la gráfica como picos abruptos que ascienden y descienden, mostraron una menor amplitud en el registro de la temperatura del suelo respecto a la temperatura del aire (ver Fig. 5a). Esto parece ser indicativo del mayor aislamiento térmico en profundidad, favoreciendo la conservación de bajas temperaturas por más tiempo.

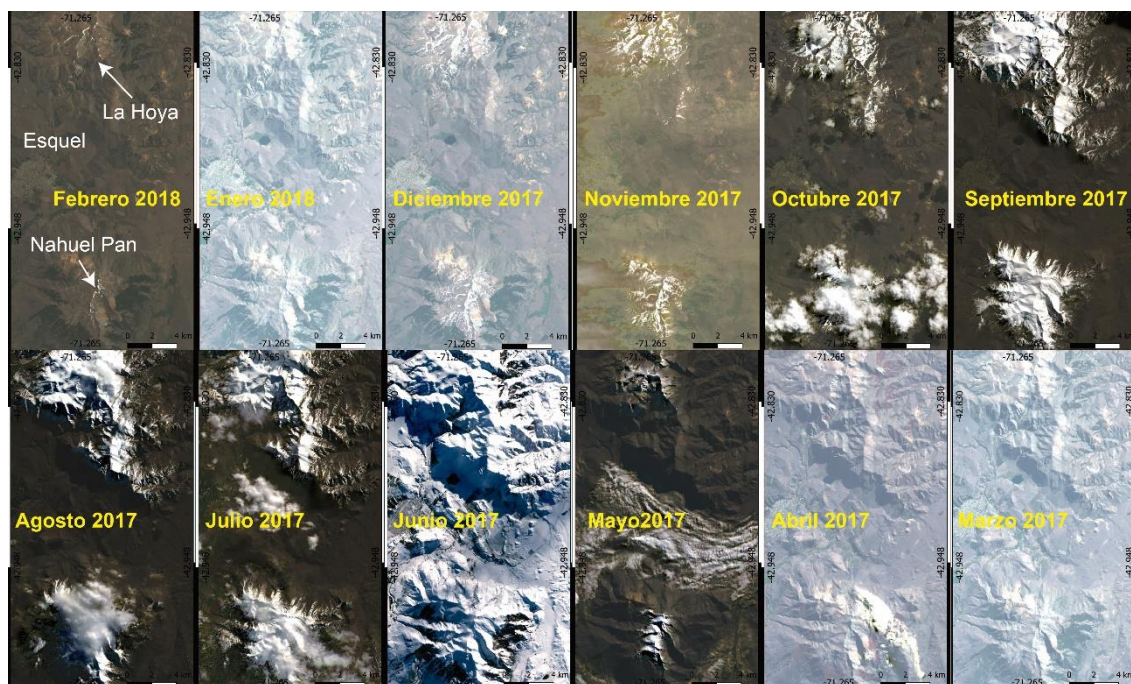


Figura 4. Secuencia de imágenes satelitales Landsat, combinación color RGB432, desde marzo del 2017 hasta febrero de 2018, donde se visualiza mensualmente la extensión de la cobertura nival en los cerros La Hoya y Nahuel Pan.

El sensor de La Hoya ubicado a mayor altitud (LH1, 2030 m.s.n.m.), registró temperaturas máximas de 12°C en el mes de febrero del 2018. En cuanto a las temperaturas mínimas, este sensor registró las menores temperaturas, del orden de los -6°C para el mes de julio de 2018 (ver Fig. 5 y Tabla I), manteniendo valores por debajo del punto de congelamiento desde mediados de mayo, hasta finales de noviembre (ver Fig. 5 y Tabla I), con un registro total de 195 días de helada continua. El sensor de La Hoya colocado a menor altura (LH2, 1870 m.s.n.m.), mantuvo desde finales de mayo hasta mediados de diciembre, durante un periodo continuo de 206 días, temperaturas de congelamiento que no variaron de 0°C, con temperaturas máximas de 8°C durante febrero del 2018 (ver Fig. 5, Tabla 1). En cuanto a los sensores ubicados en el Cerro Nahuel Pan, el ubicado a mayor altitud (NP1, 1780 m.s.n.m) registró 14°C de temperatura máxima para el mes de febrero del 2018, siendo la temperatura mínima de -3°C en el mes de septiembre (ver Fig. 5 y Tabla I). Los valores se mantuvieron por debajo del punto de congelamiento desde finales de mayo hasta principios de noviembre, por un total de 165 días consecutivos. El sensor del cerro Nahuel Pan localizado a menor cota en un lóbulo de solifluxión (NP2, 1680 m.s.n.m.) registró las máximas temperaturas en el mes de febrero del 2018, alcanzando los 13°C, y las temperaturas mínimas durante septiembre del 2017, donde alcanzó -1°C. A diferencia de los otros sensores, en este punto las temperaturas alcanzaron el punto de congelación en el mes de julio, manteniéndose por un periodo de 112 días hasta principios de noviembre.

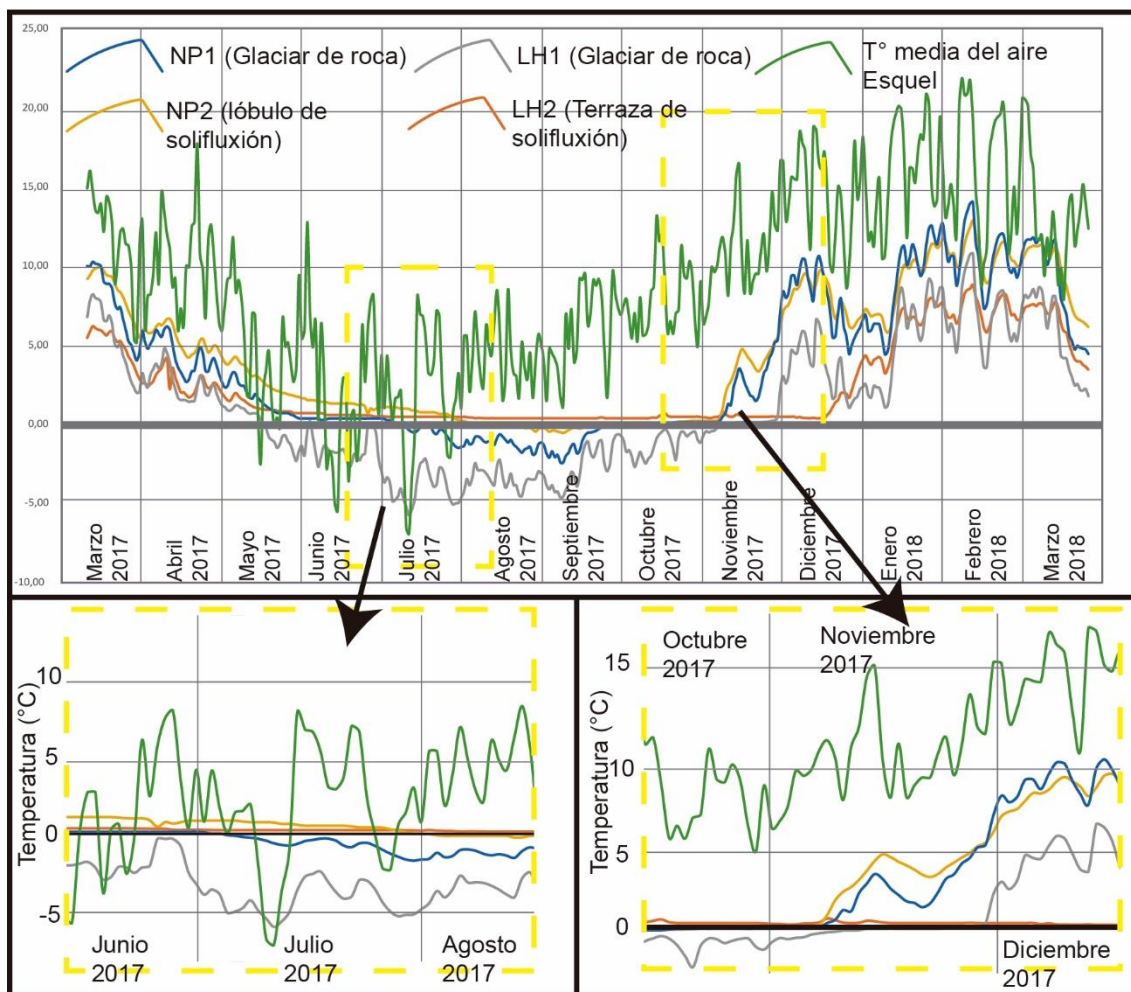


Figura 5. a) Temperatura diaria del suelo en los puntos NP1, NP2, LH1 y LH2 y la temperatura media diaria del aire de la estación meteorológica del Aeropuerto Esquel. b) Detalle del periodo junio-agosto, donde las temperaturas del suelo permanecen por debajo de 0°C, alcanzando valores de -6°C a cotas elevadas, y donde la temperatura del aire a la cota de la estación meteorológica fluctúa ampliamente con temperaturas entre -7°C y 8°C. c).

Tabla I. Días de Hielo y Deshielo (H-D), de Helada total (H) o con ausencia de heladas (AH), para cada sensor de temperatura instalado.

Sensor	La Hoya Cota Baja 1870 m.s.n.m.			La Hoya Cota Alta 2030 m.s.n.m.			Nahuel Pan Cota Baja 1.680 m.s.n.m.			Nahuel Pan Cota Alta 1.700 m.s.n.m.		
	H-D	H	A-H	HD	H	AH	HD	H	AH	HD	H	AH
mar-17	0	0	31	0	0	31	0	0	31	0	0	31
abr-17	0	0	30	0	0	30	0	0	30	0	0	30
may-17	2	7	22	4	16	11	0	0	31	1	5	25
jun-17	0	30	0	0	30	0	0	0	30	0	30	0
jul-17	0	31	0	0	31	0	1	14	16	0	31	0
ago-17	0	31	0	0	31	0	0	31	0	0	31	0

sep-17	0	30	0	0	30	0	0	30	0	0	30	0
oct-17	0	31	0	0	31	0	0	31	0	0	31	0
nov-17	0	30	0	0	26	4	1	6	23	1	7	22
dic-17	0	16	15	0	0	31	0	0	31	0	0	31
ene-18	0	0	31	0	0	31	0	0	31	0	0	31
feb-18	0	0	28	0	0	28	0	0	28	0	0	28
mar-18	0	0	31	0	0	31	0	0	31	0	0	31
Total	2	206	188	4	195	197	2	112	28	2	165	22

### Discusión:

Las geoformas depositacionales que se emplazan en el Nahuel Pan y La Hoya son unidades morfosedimentarias con detrimento de variada granulometría y porosidad que tiene la capacidad de almacenar agua, funcionando como verdaderos acuíferos subsuperficiales (Reato *et al.*, 2021, 2022). Este hecho es evidenciado en un gran número de manantiales que aflora desde estos cuerpos de detrimento y porosidad, que mantienen un régimen permanente durante las estaciones más secas y de mayores temperaturas (ver Fig. 6). Las temperaturas del suelo analizadas en el presente trabajo, favorecen el mantenimiento del agua en estado sólido hasta los primeros días de noviembre en el cerro Nahuel Pan, y hasta finales de noviembre y principios de diciembre en el Cerro La Hoya. Cuando la cobertura nival desaparece por completo, las temperaturas del suelo permanecen por encima de 0°C, favoreciendo la fusión del agua congelada en el invierno. En la cuenca hídrica de La Hoya, este derretimiento de nieve se traduce como el principal aporte de agua a la cuenca durante los meses de primavera, (Reato *et al.*, 2022).



Figura 6. Manantiales con régimen permanente y mallines de altura vinculados a glaciares de roca (inactivos? fósiles) en los cerros Nahuel Pan y la Hoya.

Las temperaturas medias del aire, si bien no corresponden con datos locales de los sitios estudiados, nos permite comparar de modo general con los patrones de temperatura del suelo. Temperaturas del aire por debajo de 0° se registraron en algunos días de mayo, junio y julio del 2017, mientras que a partir de agosto se mantuvo siempre por encima del punto de congelamiento. Esta situación favorece el derretimiento superficial de la

nieve, reduciendo significativamente su espesor a partir de este mes (ver Fig. 3). A partir de octubre las temperaturas del aire aumentaron progresivamente más rápido, conduciendo a la pérdida casi total de la cobertura nival (ver Figs. 3 y 4). Las temperaturas del suelo parecen responder al retiro de la masa nival, siendo esta última un factor clave de ese comportamiento (Edwards *et al.*, 2007; Sherstiukov and Anisimov, 2018; Goncharova *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021). Sin embargo, cabe destacar que los sensores ubicados en el Cerro La Hoya mostraron temperaturas del suelo por debajo de 0°C hasta finales de noviembre del 2018 (LH1) y mediados de diciembre del 2018 (LH2), cuando la cobertura nival se encontraba muy disminuida o ausente (ver Fig. 4). Esto, sumado a la menor amplitud térmica registrada en el suelo, le confiere a éste una mayor capacidad de aislamiento térmico subsuperficial. Estudios posteriores deberían enfocarse en mediciones de temperatura a mayor profundidad, para determinar si éste comportamiento se acentúa. Estas observaciones podrían proporcionar, además, datos sobre la presencia o ausencia de permafrost en las geoformas cuyo grado de actividad no ha podido verificarse con certeza.

Si bien la altitud influye en el registro de temperaturas mínimas, la relación de la temperatura del suelo respecto a las geoformas asociadas es también una variable interesante de analizar. Los sensores localizados en el Cerro La Hoya, ambos ubicados por encima de los 1800 m.s.n.m. registraron el mayor periodo de tiempo con temperaturas por debajo de 0°C. Sin embargo, el sensor localizado en el glaciar de roca en el Cerro Nahuel Pan a 1780 m.n.n.m. (NP1) alcanzó temperaturas menores en invierno, de -3°C, respecto al sensor localizado en la terraza de soliflucción del cerro La Hoya, a 1870 ms.n.m. con una exposición solar similar, el cual midió temperaturas entre 0°C y -1° en los meses más fríos.

Desde junio a agosto, la temperatura del aire oscila por debajo y por encima de 0°C, favoreciendo procesos superficiales de derretimiento y congelamiento en la región montañosa. Por su parte, la temperatura estacional del suelo, cercana o por debajo de 0°C, favorece a la conservación de agua en estado sólido desde mediados del invierno hasta el inicio de la época estival en profundidad. Parte del agua de fusión podría infiltrarse en los sedimentos que constituyen a las unidades depositacionales de altura de los cerros Nahuel Pan y La Hoya y mantenerse congelada en el suelo hasta el mes de noviembre.

## CONCLUSIONES

La temperatura subsuperficial del suelo en los cerros La Hoya y Nahuel Pan es una variable dependiente de la cobertura nival. Cuando la cobertura nival comienza a desaparecer, la baja amplitud térmica registrada en el suelo favorece la conservación de agua en estado sólido dentro de los sedimentos por más tiempo en el periodo en el cual se registra un aumento pronunciado en la temperatura del aire. El comportamiento anual de la temperatura del suelo favorece, junto con otras variables, la regulación del escurrimiento de agua acumulada en unidades morfosedimentarias de altura a finales de la primavera y principios del verano. Conocer en detalle todas las variables que influyen en el sostenimiento hidrológico, en una región donde el principal aporte de agua para abastecimiento ocurre desde la región montañosa, es fundamental para una mejor gestión de este recurso hídrico, el cual se encuentra bajo amenaza debido a la creciente aridización en Patagonia producto del cambio climático global.

## REFERENCIAS

- Broxton, P.D., Zeng, X., Dawson, N.: Why do global Reanalyses and land data assimilation products underestimate snow water equivalent? *J. Hydrometeorol.* 17(11), 2743–2761 2016. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0056>.
- Climate Engine, 2021. Desert Research Institute and University of Idaho. Accessed on (accessed on September 2021) <http://climateengine.org>.
- Coronato, A., Mazzoni, E., Vázquez, M., Coronato, F. 2017. Patagonia: una síntesis de su geografía física. 1ed. Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Río Gallegos, Argentina.
- Edwards, A.C., Scalenghe, R., Freppaz, M., 2007. Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: a review. *Quat. Int.* 162–163, 172–181.
- Goncharova, O.Y., Matyshak, G.V., Epstein, H.E., Sefilian, A.R., Bobrik, A.A. 2019. Influence of snow cover on soil temperatures: Meso- and micro-scale topographic effects (a case study from the northern West Siberia discontinuous permafrost zone). *CATENA* 183, 104224.
- Huntington, J., Hegewisch, K., Daudert, B., Morton, C., Abatzoglou, J., McEvoy, D., Erickson, T., 2017. Climate engine: cloud computing of climate and remote sensing data for advanced natural resource monitoring and process understanding. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 98 (11), 2397–2409 67 pp. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1>
- Martínez, O. A., Reato, A. y Serrat, D. 2017. Geomorfología de “La Hoya”, Cordón Esquel, Noroeste de Chubut. XX Congreso Geológico Argentino, S7: 94-95.
- Reato, A., Martínez, O.A., Serrat D. y Cano D.M. 2017. Glaciarismo y Periglaciarismo Cuaternario en el Cerro Nahuel Pan, Sector Extraandino del Chubut, Argentina. XX Congreso Geológico Argentino. Sesión Técnica, 18: 78-83, Tucumán.
- Reato, A. 2020. Geomorfología y geología del Cenozoico superior del Chubut extraandino con énfasis en los eventos glaciales del Pleistoceno. Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina <https://doi.org/10.35537/10915/121981> PhD thesis, 219 pp.
- Reato, A., Carol, E.S., Cottescu, A., Martínez, O.A. 2021. Hydrological significance of rock glaciers and other periglacial landforms as sustenance of wet meadows in the Patagonian Andes. *J.S.Am.Earth Sci.* 111, 103471. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103471>.
- Reato, A., Brozi G., Martínez, O.A., Carol, E. 2022. Role of rock glaciers and other high-altitude depositional units in the hydrology of the mountain watersheds of the Northern Patagonian Andes. *Science of the Total Environment* 824, 153968. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153968>.
- Ruiz, L. y Trombotto Liaudat, D. 2012. Mountain Permafrost Distribution in the Andes of Chubut (Argentina) based on a Statistical Model. 10th International Permafrost Conference. Salekhard, Yamal-nenets Russia, Vol. I, 365-370.
- Reato, A., Carol, E.S., Cottescu, A., Martínez O.A. 2021. Hydrological significance of rock glaciers and other periglacial landforms as sustenance of wet meadows in the Patagonian Andes. *Journal of South American Earth Science*, 111, 103471. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103471>.
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J.K., Walker, J.P., Lohmann, D., Toll, D. 2004. The global land data assimilation system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 85 (3), 381–394.
- Salvador-Franch F., Gómez-Ortiz A., Palacios-Estremera, D., Salvà-Catarineu, M., Plana-Castellví, J.A. 2010. Temperatura del suelo en un medio montañoso crionival (Corral del Veleta, Sierra Nevada, España). VI Seminario Latino Americano de Geografía Física II Seminario Ibero Americano de Geografía Física Universidade de Coimbra.
- Sherstiukov, A.B., Anisimov, O.A. 2018. Assessment of the Snow Cover Effect on Soil Surface Temperature from Observational Data. *Russian Meteorology and Hydrology* 43 (2), 72–78.
- Zhang, W., Shen, Y., Wang, X., Kang, S., Chen, A., Mao, W., Zhong, X. 2021. Snow cover controls seasonally frozen ground regime on the southern edge of Altai Mountains. *Agric. For. Meteorol.* 297, 108271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108271>.



# ANÁLISIS LITOSTRATIGRÁFICO DE LA UNIDAD YARUQUÍES, ECUADOR

Christian W. Romero<sup>a,b</sup>, Darwin P. Condoy<sup>a</sup>, Fausto Carranco<sup>a</sup>, Ana B. Gramal<sup>a</sup>,

<sup>a</sup> Instituto de Investigación Geológico y Energetico, Quito, Ecuador.

<sup>b</sup> School of Geosciences, Faculty of Sciences Charles University, Praga, Republica Checa  
e-mail: [wladimir.romero@geoenergia.gob.ec](mailto:wladimir.romero@geoenergia.gob.ec)

## RESUMEN

*En el sur de los Andes del Norte (Ecuador), la Depresión Interandina alberga a diversas secuencias de sedimentos continentales del Mioceno al Plioceno. En la cuenca de Riobamba estas secuencias no han sido discriminadas, esto ha ocasionado incertidumbre en el conocimiento de la historia de evolución geológica en este periodo de tiempo, en esta región. El objetivo de esta investigación es discriminar una secuencia de redbeds nombrada previamente Unidad Yaruquíes, del registro volcanoclástico Mio-Plioceno de la Depresión Interandina; para lo cual se realizó un detallado análisis litoestratigráfico, que incluyó: identificación y caracterización de litofacies, asociación de litofacies, medición de paleocorrientes y definición del ambiente de sedimentación. La Unidad Yaruquíes aflora al sur de Riobamba, en el sector de Yaruquíes, esta secuencia de primer orden cubre en discordancia angular a andesitas y rocas verdes del Grupo Saraguro, su espesor alcanza los 260 metros y es cubierta en discordancia por depósitos volcánicos indiscriminados del Plioceno. En la Unidad Yaruquíes se reconocieron 9 litofacies: conglomerado oligomítico, clasto-soportado, masivo (Gcm), conglomerado oligomítico, matriz soportado, con gradación normal (Gmg), conglomerado oligomítico, clasto-soportado, con gradación inversa (Gci), conglomerado polimítico, clasto y matriz-soportado, con estratificación cruzada y gradación normal (Gp), litoarenisca de grano grueso a medio, con estratificación cruzada transversal y gradación normal (St), litoarenisca de grano medio, con estratificación cruzada planar y gradación normal (Sp), litoarenisca de grano fino, masiva (Sm), litoarenisca limosa multicolor con laminación paralela, small-ripples (Fl), limolita arenosa multicolor, masiva con restos de materia orgánica (Fsm), limolita café, con grietas de desecación (Fm). Estas litofacies se organizan en secuencias estrato-decrecientes y grano-decrecientes, en canales, barras de grava, barras de arena, planicies arenosas, planicies de inundación. Los canales se distribuyen de manera aislada en planicies de inundación. Barras de grava y arena son observadas en 2 dimensiones (2D) y no presentan figuras de acreción lateral; sin embargo, presentan continuidad vertical, éstas características son comunes en depósitos de barras de punto (point bars) en sistemas de ríos meándricos.*

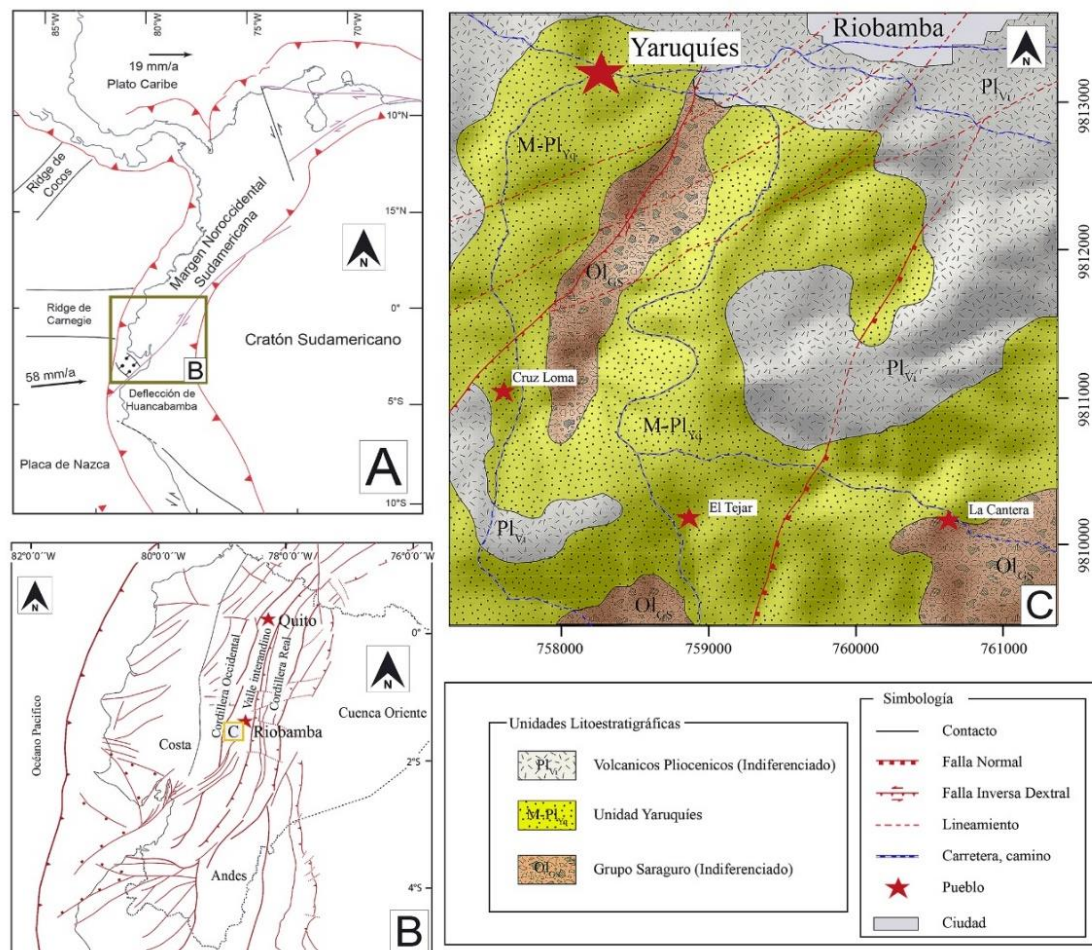
Palabras Clave: Unidad Yaruquíes, Sedimentología, Depresión Interandina, Ecuador.

## INTRODUCCIÓN

El Valle o Depresión Interandina es una característica morfológica del sur de los Andes del Norte, consiste en un sistema de grabens formado por esfuerzos de traspresión entre la cordillera Real y la cordillera Occidental (Tibaldi y Ferrari, 1992; Fiorini y Tibaldi, 2012; Siravo et al., 2021). Este sistema de grabens ha formado diversas cuencas (Chota, Guayllabamba, Quito, Latacunga – Ambato, Riobamba - Alausí) con historia de evolución geológica distinta y particular una con respecto de otra (Winkler et al., 2005). La estratigrafía de cada cuenca es dominada por depósitos volcánicos y volcanoclásticos relativamente bien estudiados en las cuencas del norte (Chota, Guayllabamba, Quito,

Latacunga – Ambato); Sin embargo, en la cuenca de Riobamba – Alausí, el relleno de la cuenca no ha sido estudiado a detalle, es así como varias secuencias sedimentarias han sido incluidas en la Unidad Volcánicos Indiscriminados la cual agrupa todo el volcanismo Pliocénico (DINAGE, 2000; Villagomez et al., 2002). Esto constituye un problema cartográfico regional debido a que la ausencia de información obstaculiza el entendimiento de la evolución geológica en los Andes del Norte.

El basamento de la cuenca de Riobamba – Alausí, se compone de rocas volcánicas de composición andesítica a dacítica, y rocas volcanoclásticas del Grupo Saraguro del Eoceno (Eguez et al., 1992; Steinmann et al., 1999), las cuales en esta cuenca no han sido discriminadas. El relleno de cuenca incluye a múltiples secuencias de *redbeds*, que afloran al sur de Riobamba (DINAGE, 2001). En estos depósitos se han documentado familias de esporas del Mioceno Inferior (Ordoñez, 2002). La Unidad Alausí consiste en intercalaciones de series conglomeráticas y volcanoclásticas que afloran al norte de Alausí. Estos depósitos se encuentran plegados y afectados por la dinámica cuaternaria (Eguez et al., 1992). Potentes ciclos conglomeráticos de origen fluvial fueron reportados en la cuenca del río Chambo (DINAGE, 2000). Depósitos de avalancha de escombros interactúan con depósitos de origen lacustre al sureste de Riobamba (Barba et al., 2008). En la actualidad se desconoce la relación estratigráfica de estas secuencias que corresponden al relleno sedimentario y volcanoclásticos de la cuenca de Riobamba – Alausí, razón por la cual es imposible plantear una historia de evolución geológica coherente con la evolución andina en el intervalo Mioceno a Reciente.



**Figura 1.** Mapa de Ubicación. A. Esquema tectónico de la margen noroccidental sudamericana. B. Ubicación de la Cuenca de Riobamba en el contexto morfo-tectónico del Ecuador. C. Mapa geológico del área de Yaruquíes

Esta investigación presenta la caracterización litoestratigráfica de la Unidad Yaruquíes y es sustentada por la identificación de litofacies, asociación de litofacies, elementos arquitectónicos, arquitectura estratigráfica y detalle de paleo-corrientes. A partir de esta descripción se propone un ambiente de sedimentación para esta secuencia. Este trabajo se realizó como parte del Proyecto de Investigación Geológica y Disponibilidad de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano, en la Hoja Geológica de Riobamba, escala 1: 100.000, en el año 2021.

## **MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Esta investigación presenta criterios y características técnicas útiles para la identificación, caracterización y discriminación de rocas detríticas en campo. Se toma de ejemplo el levantamiento litoestratigráfico y la descripción de la arquitectura estratigráfica de un mega-afloramiento de la Unidad Yaruquíes en la cuenca de Riobamba, en el centro sur de la Depresión Interandina en los Andes ecuatorianos.

Este trabajo considera el término facie definido por Walker, (1990) como: un cuerpo de roca caracterizado por una particular combinación de litologías, estructuras físicas y biológicas que le confieren un aspecto diferente a los cuerpos de rocas adyacentes dentro de una secuencia. De esta manera, reportamos la caracterización litológica y petrográfica de muestras tipo, descripción detallada de la textura, estructuras sedimentarias y superficies de erosión incluyendo en la descripción conceptos de asociación de facies y ambientes sedimentarios análogos (James y Dalrymple, 2010; Miall, 2016). En la medición de paleo-corrientes se consideró superficies de erosión y estructuras sedimentarias de transporte como son imbricación y sets con estratificación cruzada. Siguiendo a Tucker (2001), estos datos fueron analizados mediante una media geométrica estadística para definir la dirección de la paleo-corriente.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Relaciones de campo**

En el centro-sur de la Depresión Interandina la cuenca de Riobamba – Alausí, está limitada geográficamente al sureste por la falla sinistral inversa Bonbog, asociada morfológicamente a la falla Ingapirca. Mientras que al noroeste esta cuenca es limitada por el volcán Chimborazo que corresponde al principal accidente morfológico de la región. Al este el sistema de fallas Pallatanga – Pujilí – Calacalí es el límite de la Depresión Interandina (ver Figura 1). Al nor-oeste de Riobamba, en las inmediaciones de Yaruquíes (UTM: 758191E, 9812052N) potentes estratos de andesitas verdes, porfiríticas y afaníticas, con fenocristales de plagioclasa y abundante epidota, que son asociados al Grupo Saraguro (indiscriminado) son cubiertos en discordancia angular por potentes secuencias de conglomerados, areniscas y limolitas multicolores de la Unidad Yaruquíes (ver Figuras 1,2,3). El espesor de la Unidad Yaruquíes fue estimado a 260 metros, en función de observaciones morfológicas y topográficas en el noroeste de la cuenca. Al sureste de la cuenca en las márgenes del río Chambo limolitas arenosas multicolores de la Unidad Yaruquíes son cubiertos en conformidad por conglomerados, areniscas y tobas de la Unidad Alausí. La Tabla 1 presenta el resumen de litofacies documentadas en la Unidad Yaruquíes, las cuales son descritas a detalle a continuación:

**Tabla 1.** Resumen de litofacies de la Unidad Yaruquíes

Litofacie	Litología	Estructuras sedimentarias	Interpretación
<b>Gcm</b>	Conglomerado oligomíctico, clasto-soportado,	Masivo	Flujo de escombros pseudo-plástico
<b>Gmg</b>	Conglomerado oligomíctico, matriz soportado, de matriz areno-limosa	Gradación normal	
<b>Gci</b>	Conglomerado oligomíctico, clasto soportado,	Gradación inversa	
<b>Gp</b>	Conglomerado polimíctico, clasto y matriz soportado, de matriz arenosa	Estratificación cruzada planar, gradación normal	Barras de grava (2D)
<b>St</b>	Litoarenisca de grano grueso a medio, bien sorteada	Estratificación cruzada transversal, gradación normal	Barras de arena (2D)
<b>Sp</b>	Litoarenisca de grano medio, moderadamente bien sorteada	Estratificación cruzada planar, gradación normal	
<b>Sm</b>	Litoarenisca de grano fino	Masivo	
<b>Fl</b>	Litoarenisca limosa multicolor	Laminación paralela, <i>ripples</i> unidireccionales	Planicies de inundación
<b>Fsm</b>	Limolita arenosa multicolores	Masiva, restos de materia orgánica	
<b>Fm</b>	Limolita café con tonalidad rojisa	Masiva, clastos volcánicos y metamórficos, grietas de desecación	

Nota: Fotografías y esquemas de las diferentes litofacies pueden ser observadas en la Figura 2.

### Sedimentología de la Unidad Yaruquíes

*Litofacies Gcm.* - en la base de la secuencia se observan estratos de 2 a 4 metros de espesor, de geometría cóncava, lateralmente discontinuos, compuestos por conglomerados clasto-soportados, oligomícticos, masivos. Los clastos tienen bajo sorteo, son sub-redondeados a sub-angulares e incluyen a filitas, cuarcitas y minoritariamente andesitas (ver Figura 2A). Ocasionalmente se observan niveles de brechas clasto-soportadas, monomícticos, con fragmentos angulares a sub-redondeados, de composición andesítica, muy mal sorteadas.

*Litofacies Gmg.* – son frecuentemente observadas en la base de la Unidad Yaruquíes en estratos de 50 a 125 centímetros. Se componen de conglomerados oligomícticos, matriz-

soportados, con clastos sub-redondeados a redondeados, de cuarcitas y filitas distribuidos de manera gradacional (gradación normal) en una matriz areno-limosa (ver Figura 2C).

*Litofacies Gci.* – son observados en la base de la secuencia, en asociación con Gcm y Gmg, consisten en estratos centimétricos, de 20 a 60 centímetros, de geometría lenticular, lateralmente discontinuos, compuestos por conglomerados oligomícticos, clasto-soportados, imbricados con clastos, sub-redondeados a redondeados, de cuarcitas, filitas y esporádicos clastos andesíticos (ver Figura 2B).

La asociación de litofacies Gcm, Gmg y Gci, involucra a depósitos de grava, con imbricación y gradación normal o inversa, e intervalos masivos, organizados en estratos de morfología lobular, cóncava a convexa, lateralmente discontinuos, estas características son comunes en depósitos de flujo de escombros pseudo-plástico (FEPP) (Miall, 2016), estos flujos erosionan el lecho fluvial, su incisión forma canales que son rellenados por barras de grava o arena (Nichols y Fisher, 2007).

*Litofacies Gp.* – dominan la parte media y superior de la secuencia, consisten en gruesos estratos (1 a 4 metros), de morfología lenticular, geometría cóncava-convexa, lateralmente discontinuos, compuestos por conglomerados polimícticos, clasto y matriz soportado, con estratificación cruzada planar y gradación normal. Los clastos son sub-redondeados a redondeados, con buena esfericidad y bien sorteados, su composición incluye: filitas, cuarcitas, andesitas, brechas volcánicas y rocas verdes (ver Figura 2D). Las características observadas en Gp concuerdan con los depósitos de barras de grava observadas en dos dimensiones (Colombera et al., 2012).

*Litofacies St.* – son frecuentemente observadas en la parte superior de la secuencia, consisten en estratos de 50 a 120 centímetros, de geometría convexa, con buena continuidad lateral, compuestos de litoareniscas de color gris con tonalidad morada y roja, de grano grueso a medio, bien sorteadas, con estratificación cruzada transversal y gradación normal. Su mineralogía incluye cuarzo, hornblenda, y moscovita, también se observan gránulos elongados de filitas, cuarcitas y andesitas (ver Figura 2D).

*Litofacies Sp.* – pueden ser observadas en la parte media de la secuencia, consisten en estratos de 25 a 150 centímetros, de morfología lenticular, geometría cóncava a convexa, con buena continuidad lateral, compuestos de litoareniscas de color gris con tonalidad morada y roja, de grano medio, mal a moderadamente bien sorteadas, con estratificación cruzada planar y gradación normal. Su mineralogía incluye cuarzo, hornblenda, plagioclasa, y moscovita, es común encontrar gránulos a clastos de filitas y cuarcitas (ver Figura 2H).

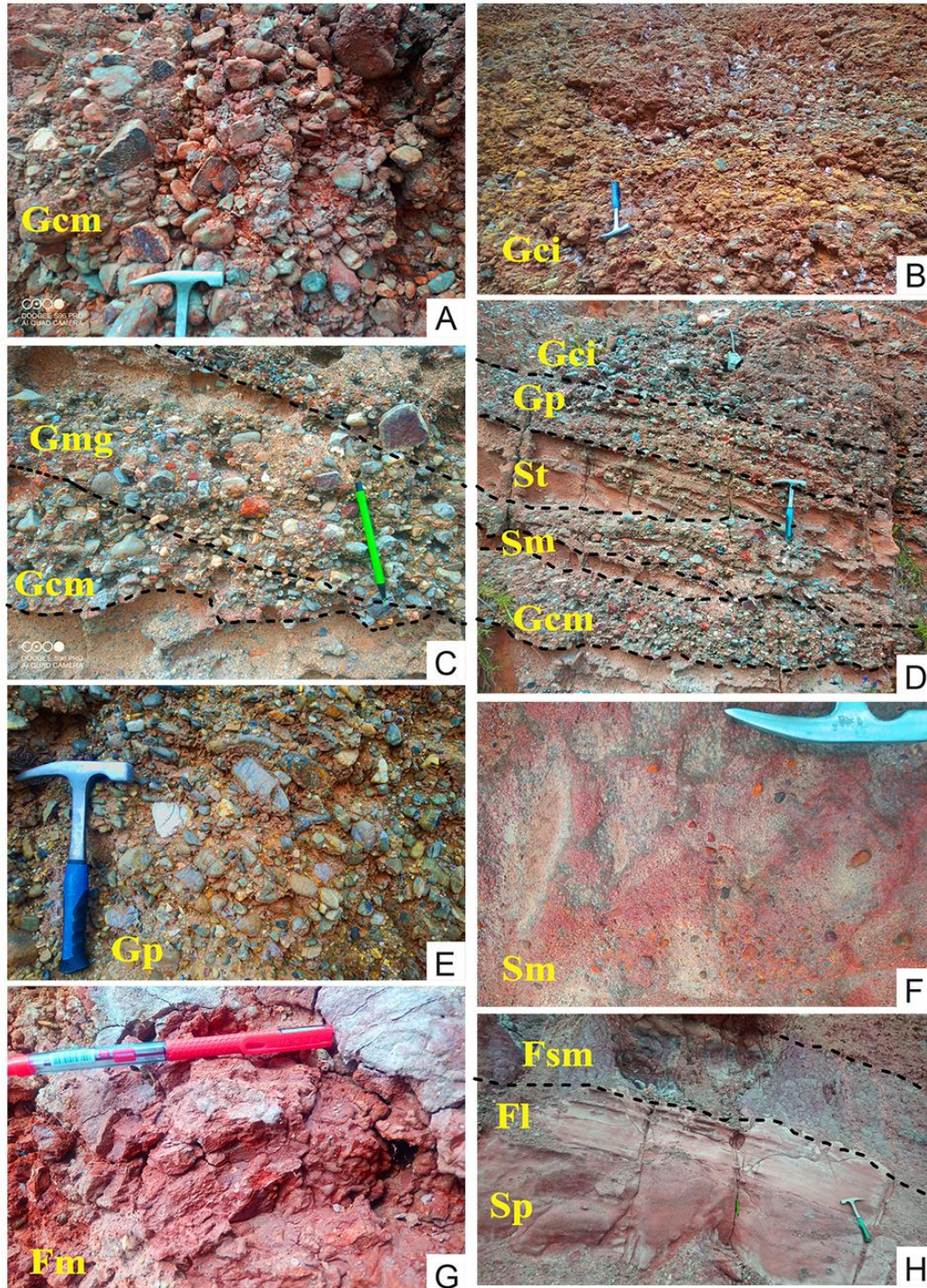
*Litofacies Sm.* – es común observar Sm en asociación con Sp y St en la parte media de la secuencia. Consisten en estratos finos, de 10 a 20 centímetros, de geometría tabular, lateralmente discontinuos, compuestos de litoareniscas, de color rojo con tonalidad morada, de grano fino a muy fino, moderadamente sorteadas, masivas. Su mineralogía incluye cuarzo, moscovita y minerales arcillosos, también es común encontrar clastos de cuarcitas y filitas (ver Figura 2F).

La asociación de litofacies St, Sp y Sm, agrupa a litoareniscas de grano grueso a fino, con intervalos estratificados, gradados y masivos, estas características son frecuentes en barras de arena que rellenan canales previamente formados (Owen et al., 2017).

*Litofacies Fl.* - dominan la parte superior de la secuencia, consisten en estratos de 50 centímetros a 2 metros, de geometría tabular, lateralmente continuos, compuestos por litoareniscas limosas, de grano muy fino, moderadamente bien sorteadas, con laminación paralela y *small-ripples*. Su mineralogía incluye cuarzo, hornblenda, moscovita y

minerales arcillosos, también es común observar gránulos de cuarcitas y andesitas (ver Figura 2H).

*Litofacies Fsm.* – son frecuentemente observadas en la parte media y superior de la secuencia, consisten en estratos de 1 a 2 metros, de geometría tabular, lateralmente continuos, compuestos por limolitas arenosas de color rojo, violeta, gris, verde y morado, masivas, también es común observar restos de materia orgánica (restos de hojas y raíces) (ver FiguraS 2D, 2H).



**Figura 2.** Litofacies de la Unidad Yaruquíes. A. Litofacies *Gcm*. B. Litofacies *Gci*. C. Intercalaciones entre litofacies *Gmg* y *Gcm*. D. Intercalaciones entre litofacies *Gci*, *Gp*,

*St, Sm, Gcm. E. Litofacies Gp. F. Litofacies Sm. G. Litofacies Fm. H. Intercalaciones entre litofacies Fms, Fl y Sp.*

*Litofacies Fm.* – son observadas en asociación con Fl y Fsm, en la parte superior de la secuencia. Consisten en estratos de 50 a 120 centímetros, de morfología periclinal, de geometría tabular, con buena continuidad lateral, compuestos de limolitas de color café con tonalidad roja y violeta, masivas, con grietas de desecación, también es común observar clastos de andesitas, dacitas, filitas, cuarcitas y rocas verdes (ver Figura 2G).

La asociación de litofacies Fl, Fsm y Fm, incluye a areniscas limosas, limolitas arenosas y limolitas, con estructuras de fondo, como son laminación paralela, *small-ripples* e intervalos masivos con grietas de desecación y restos de materia orgánica, estos elementos son comunes en planicies de inundación (Foix et al., 2013; Miall, 2016).

### **Elementos arquitectónicos y Arquitectura estratigráfica de la Unidad Yaruquíes**

*Canales fluviales (CH).* – En la base de los canales se identifica una superficie de erosión de cuarto orden, presentan morfología lenticular y tabular, y su espesor varía de 3 a 15 metros. Depósitos de canales fluviales involucran a litofacies Gcm, Gmg, Gci, Gp, St y Sp, estas litofacies se organizan en secuencias de tendencia estrato decreciente y los estratos muestran tendencia grano decreciente. En la base de los canales es común observar flujos de escombros pseudo plásticos. Mientras que el tope de los canales es rellenado y erosionado por barras fluviales (GB y SB).

Barras de grava (GB). – son limitadas por superficies de erosión de cuarto orden, presentan morfología lenticular y tabular, lateralmente discontinuas, sin embargo, con continuidad vertical. Su espesor varía de 5 a 10 metros y se componen de intercalaciones de Gmg y Gp organizadas en tendencia estrato decrecientes. Datos de paleo-corrientes medidos en estos niveles indican que el transporte de sedimento tiene una dirección predominante de N15°O.

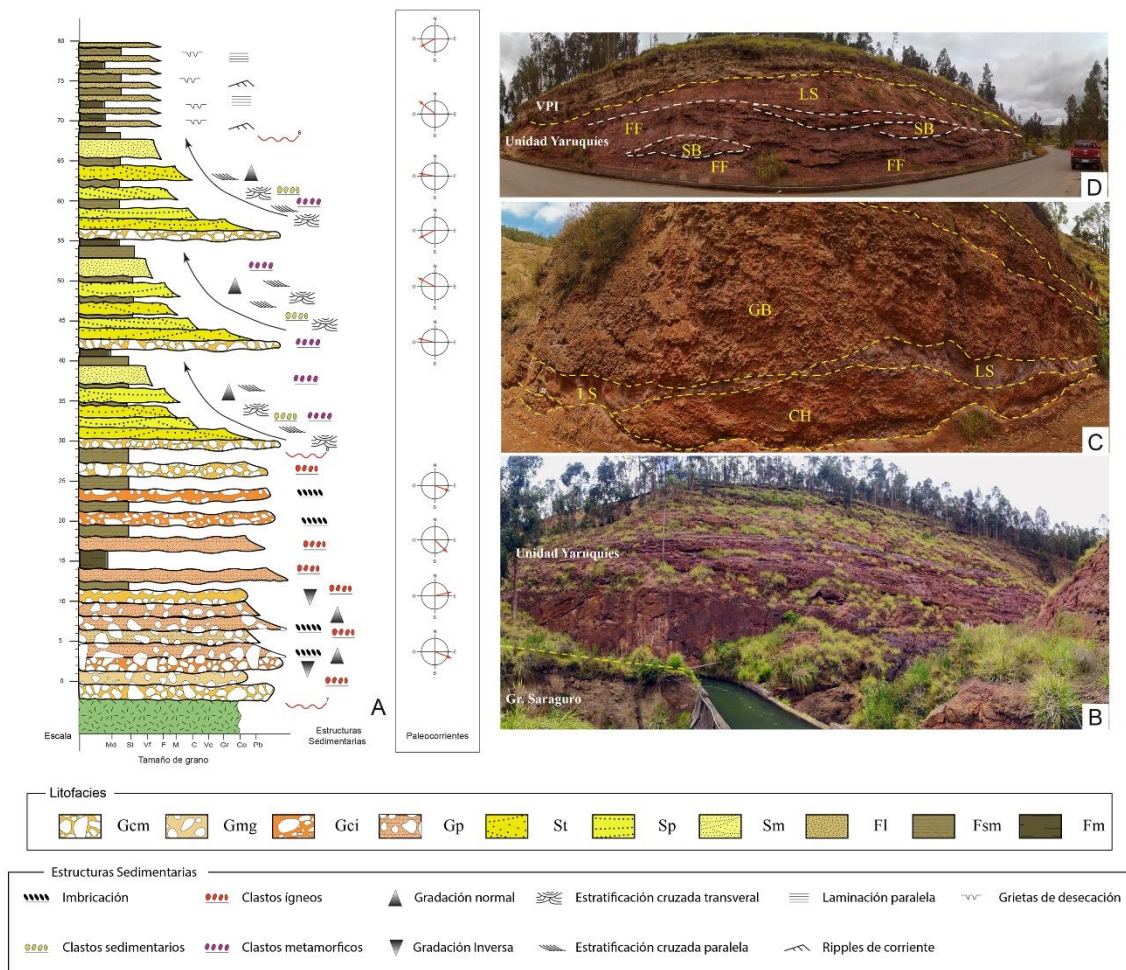
Barras de arena (SB). – se presentan en asociación con GB, están limitados por superficies de erosión de cuarto y tercer orden, presentan morfología lenticular, convexa, lateralmente discontinuas. Su espesor varía de 12 a 20 metros y se componen de intercalaciones de St, Sp y Sm, las cuales están organizadas en tendencia estrato decrecientes. Datos de paleo-corrientes medidos en estos niveles indican que el transporte de sedimento tiene tres direcciones predominantes de N30°O, N10°E y N45°E.

Planicies arenosas (LS). – cubren en concordancia a GB y SB, tienen morfología tabular, lateralmente continuas, están limitadas por superficies de tercer orden, se componen de intercalaciones simétricas de Sm y Fsm, sin tendencia definida, su espesor alcanza los 3 metros.

Planicies de inundación (FF). – se presentan en el tope de LS, con morfología planar, de buena continuidad lateral, son limitadas por superficies de cuarto orden, agrupan a Fl, Fsm y Fsm, su espesor alcanza los 2m.

Los canales son rellenados por depósitos de flujo de escombros pseudo-plástico, que forman la base erosiva del canal (*lag channel deposit*), barra de grava y barras de arena, estos elementos presentan tendencia estrato-decreciente y grano-decrecientes. No se observan características de acreción lateral, tanto canales como barras están distribuidos en planicies de arena y planicies de inundación. Las planicies de arena consisten en límites internos que limitan el crecimiento vertical de barras, mientras que planicies de inundación

son erosionadas por el emplazamiento de canales (ver Figura 3E). Estos elementos arquitectónicos son comunes en ríos meándricos (Nichols y Fisher, 2007; Miall, 2016).



**Figura 3.** Afloramiento tipo y litofacies de la Unidad Yaruquíes. A. Columna estratigráfica del afloramiento tipo de la Unidad Yaruquíes. B. Límite inferior de la secuencia, contacto entre el Grupo Saraguro y la Unidad Yaruquíes. C. Parte inferior, de la secuencia conglomerática de la Unidad Yaruquíes. D. Parte superior, de la secuencia limoarenosa de la Unidad Yaruquíes. CH: Canal, GB: Barra de grava, SB: Barra de arena, LS: planicie de arena, FF: planicie de inundación.

## CONCLUSIONES

- En el centro sur de la Depresión Interandina, al sur oeste de Riobamba, la Unidad Yaruquíes, se deposita en discordancia angular sobre rocas volcánicas del Grupo Saraguro.
- La Unidad Yaruquíes constituye una secuencia de 260 metros de espesor, de tendencia estrato-decreciente y grano-decreciente, que incluye a: conglomerados oligomícticos, clasto-soportados, masivos (*Gcm*), conglomerados oligomícticos, matriz-soportados, con gradación normal (*Gmg*), conglomerados oligomícticos, clasto-soportado, con gradación inversa (*Gci*), conglomerados polimícticos, clasto y matriz-soportados, con estratificación cruzada y gradación normal (*Gp*), litoareniscas de grano grueso a medio, con estratificación cruzada transversal y gradación normal (*St*), litoareniscas de grano medio, con estratificación cruzada planar y gradación normal (*Sp*), litoareniscas de grano fino, masiva (*Sm*),



litoareniscas limosas multicolores con laminación paralela, *small-ripples* (Fl), limolitas arenosas multicolores, masivas con restos de materia orgánica (Fsm), limolitas café, con grietas de desecación (Fm).

- La arquitectura estratigráfica observada en la Unidad Yaruquíes incluye a canales fluviales distribuidos de manera aislada en planicies de inundación; barras de grava y barras de arena con continuidad vertical, cubiertas por planicies de arena. Estos elementos arquitectónicos están separados por superficie de erosión de cuarto y tercer orden. Estas características son comunes en depósitos de barras de punto (*point bars*) en sistemas de ríos meándricos.

## REFERENCIAS

- Barba, D., Robin, C., Samaniego, P., & Eissen, J. P. (2008). Holocene recurrent explosive activity at Chimborazo volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 27-35.
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J. M., & Santacrose, R. (1988). Plio-quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125(1), 1-14.
- Colombera, L., Mountney, N. P., & McCaffrey, W. D. (2012). A relational database for the digitization of fluvial architecture: concepts and example applications.
- Eguez, A., Dugas, F., & Bonhomme, M. (1992). Las unidades Huigra y Alausí en la evolución geodinámica del Valle Interandino del Ecuador. *Boletín Geológico Ecuatoriano*, 3(1), 47-55.
- Fiorini, E., & Tibaldi, A. (2012). Quaternary tectonics in the central Interandean Valley, Ecuador: Fault-propagation folds, transfer faults and the Cotopaxi Volcano. *Global and Planetary Change*, 90, 87-103.
- Foix, N., Paredes, J. M., & Giacosa, R. E. (2013). Fluvial architecture variations linked to changes in accommodation space: Río Chico Formation (late Paleocene), Golfo San Jorge basin, Argentina. *Sedimentary Geology*, 294, 342-355.
- James, N. P., & Dalrymple, R. W. (2010). *Facies Models 4: St. John's, Newfoundland*, Geological Association of Canada.
- Miall, A. D. (2016). Facies models. In *Stratigraphy: A Modern Synthesis* (pp. 161-214). Springer, Cham.
- Nichols, G. J., & Fisher, J. A. (2007). Processes, facies and architecture of fluvial distributary system deposits. *Sedimentary geology*, 195(1-2), 75-90.
- Ordoñez, M., Jiménez, N., & Suarez, J. (2006). *Micropaleontología Ecuatoriana: Petroproducción* (filial de Petroecuador). Centro de Investigaciones Geológicas de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
- Owen, A., Ebinghaus, A., Hartley, A. J., Santos, M. G., & Weissmann, G. S. (2017). Multi-scale classification of fluvial architecture: An example from the Palaeocene–Eocene Bighorn Basin, Wyoming. *Sedimentology*, 64(6), 1572-1596.
- Siravo, G., Speranza, F., Mulas, M., & Costanzo-Alvarez, V. (2021). Significance of northern Andes terrane extrusion and genesis of the Interandean Valley: Paleomagnetic evidence from the “Ecuadorian Orocline”. *Tectonics*, 40(7), e2020TC006684.
- Steinmann, M., Hungerbühler, D., Seward, D., & Winkler, W. (1999). Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 307(3-4), 255-276.

Tibaldi, A., & Ferrari, L. (1992). From latest Miocene thrusting to Quaternary transpression and transtension in the Interandean Valley, Ecuador. *Journal of geodynamics*, 15(1-2), 59-83.

Tucker, M. E. (Ed.). (2001). *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. John Wiley & Sons.

Villagómez, D., Eüez, A., WINKLER, W., & SPIKINGS, R. (2002). Pifo-Quaternary Sedimentary and Tectonic Evolution of the Central Inter-Andean Valley in Ecuador. *City*, 10, 5.

Walker, R. G. (1990). Facies modeling and sequence stratigraphy: perspective. *Journal of Sedimentary Research*, 60(5).

Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P., & Egüez, A. (2005). The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(1), 5-19.

# EFFECTO DE LA CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS EXTRA PESADO SOBRE LA COLONIZACIÓN POR LAS MICORRIZAS ARBUSCULARES EN LA RIZÓSFERA PASTO VETIVER

Jesmary Rosas<sup>a</sup>, Afrodita García-Angarita<sup>a</sup>, Ysvic Inojosa<sup>a</sup>, Angela De Sisto<sup>a</sup>,  
Mingrelia España<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dirección de Energía y Ambiente, Fundación Instituto de Estudios Avanzados (IDEA),  
Caracas, Venezuela

<sup>b</sup> Dirección de Agronomía y Soberanía Alimentaria, Fundación Instituto de Estudios  
Avanzados (IDEA), Caracas, Venezuela

e- mail: [jesmaryrosasb@gmail.com](mailto:jesmaryrosasb@gmail.com)

## RESUMEN

*La contaminación del suelo es uno de los problemas ambientales más importante a niveles globales ocasionados por la actividad industrial, donde el derrame de hidrocarburos derivados del petróleo ocupa uno de los primeros lugares en el mundo. Actualmente, se están desarrollando estrategias y técnicas de recuperación de áreas afectadas por la contaminación por crudo como es el caso del empleo de los Hongos Micorrizicos Arbusculares (HMA) en simbiosis con plantas fitorremediadora, que permiten la mitigación de dicha contaminación. Las HMA forman parte de los microorganismos presente en la rizósfera y es afectada por la presencia de elementos potencialmente tóxicos. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo de investigación es mostrar el efecto de diferentes dosis de hidrocarburo extrapesado en la colonización por HMA de las raíces del Pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L. Nash). El diseño experimental consistió en tres tratamientos con diferentes dosis de hidrocarburo extrapesado (TPH2, TPH4, TPH8, C<sup>+</sup>, C) proveniente de la Faja petrolífera del Orinoco en la región oriental de Venezuela, el tiempo de desarrollo del ensayo fue de 180 días. Los indicadores evaluados fueron longitud radical y el porcentaje de raíces micorrizadas en el Pasto Vetiver cultivado en los diferentes tratamientos. La longitud radical promedio para TPH2 fue de 49.55 cm, 60,54 cm en TPH4, y TPH8 de 74.58 cm, en cuanto al %LRM se obtuvo el porcentaje mayor en el control positivo (88.08 %) seguido por el TPH8 (51.67 %). Se encontró diferencias significativas (variable % LRM) entre todos los tratamientos y los controles, lo cual sugiere que existe un efecto sobre la micorrización. Además, con este ensayo se demostró la efectividad de la simbiosis vetiver-HMA ya que hubo una tolerancia de la planta a diversas concentraciones del hidrocarburo, siendo este sistema aplicable a la recuperación del recurso suelo impactado por crudo extrapesado.*

Palabra Clave: Vetiver, Micorrizas, Hidrocarburos, Suelos

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del ambiente con petróleo o sus derivados constituye uno de principales problemas que afectan al mundo por sus evidentes efectos a la fauna y flora autóctona. En Venezuela, esta problemática ambiental surge desde mediados del siglo XX, cuando se da inicio a las primeras actividades exploratorias de perforación petrolera (Delón, F, 2001)

En los diferentes procesos involucrados en la cadena de valor de la industria petrolera (exploración y producción, refinación y comercio y suministro), se pueden presentar derrames accidentales que afectan suelos y cuerpos de agua. La presencia de petróleo en el suelo altera su composición química, en especial, la relación carbono- nitrógeno, la estructura y composición de la materia orgánica, el pH, su conductividad, entre otros (Mogrovejo, 2019; Wang et al, 2017). La microflora del suelo también se ve afectada por la contaminación con hidrocarburos, modificando el crecimiento de los microorganismos sensibles a su toxicidad e incrementando las poblaciones de microorganismos capaces de sintetizar enzimas adaptativas (lacasas, tirosinasas, catecol oxidasas, hidroxilasas, oxidasas fenólicas no específicas, peroxidasas lignínicas) que degradan, entre otros, los contaminantes derivados de los hidrocarburos (Mogrovejo, 2019; Meharg, 2018; Alisi et al, 2009). Adicionalmente, la presencia de petróleo en el suelo dificulta el crecimiento de plantas al reducir la capacidad de germinación de las semillas y su resistencia a plagas y enfermedades (Mogrovejo, 2019; Shan et al, 2014; Xu and Lu, 2010; Zhu et al, 2013). Así también, los compuestos del petróleo reaccionan con el nitrógeno y fósforo inorgánicos disminuyendo su bio-disponibilidad (Pinchin et al, 2013, Liao et al, 2015).

Existe un creciente aumento en el desarrollo y utilización de diferentes métodos y tecnologías con la finalidad de atenuar los efectos causados por la contaminación por petróleo, por lo cual, desde el punto de vista sostenible (Garzón et al, 2017), se ha sugerido la biorremediación como una de estas estrategias. La Biorremediación se basa en el uso de microorganismos, hongos, plantas o enzimas derivadas de ellos para la restauración del ambiente (Rodríguez y Sánchez, 2003) con la finalidad de mitigar los efectos nocivos causados por los contaminantes ambientales, por otra parte, constituye una técnica biológica viable y atractiva para restaurar suelos contaminados con hidrocarburos. Dentro de los tipos de biorremediación, está la fitorremediación, técnica basada en el empleo de una planta o combinación de plantas con microorganismos asociados a la rizósfera, para remover, degradar o inmovilizar contaminantes localizados en suelos, sedimentos, aguas superficiales (Prasad et al, 2010), por otra parte, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), endo-simbiontes obligados de las raíces que pertenecen al Phylum Glomeromycota (Pagano et al, 2016). Los HMA forman relaciones simbióticas con el 72% de plantas vasculares y representan del 5 al 10% de la biomasa microbiana del suelo (Brundrett and Tedersoo, 2018). Los HMA proveen a la planta hospedera nutrientes como fósforo, nitrógeno, zinc, manganeso y

cobre (Liu and Dalpé, 2009), protección contra el estrés abiótico y protección contra patógenos del suelo, a cambio la planta provee al hongo la fuente de carbono y un nicho ecológico (Smith and Read, 2008; Gao et al, 2011; Ismail et al, 2011). En el contexto de la contaminación edáfica por hidrocarburos, los hongos micorrízico-arbusculares incrementan la eficacia de la fitorremediación, mediante: el mejor desarrollo de la planta y de las raíces, así como el incremento de la actividad de los microorganismos de la rizósfera, y estimulan la mayor adsorción y bioacumulación de los hidrocarburos en la zona radicular (Rajtor and Piotrowska, 2016). En Venezuela, Hernandez, I. y Mager, D., 2003, Merkl et al, 2004 y Brandt et al, 2006 han seleccionado varias especies de plantas con potencialidad fitorremediadora en suelos impactados con hidrocarburos. Algunos autores, Rosas, 2008, y Rosales et al, 2015 han evaluado la respuesta planta-HMA frente a un contaminante (lodos petrolizados y suelos impactados con crudo) mediante indicadores agronómicos asociados a la planta tales como: la altura de la planta, número de esquejes, longitud radical, diámetro de la macolla, encontrando que las micorizas arbusculares parecieran tener un papel importante en la tolerancia que presentó la gramínea Vetiver, a diferentes dosis del contaminante.

El objetivo del presente trabajo de investigación es mostrar el efecto de diferentes dosis de hidrocarburo extrapesado en la colonización por HMA de las raíces del Pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L. Nash).

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

**Área de Estudio:** Las muestras de suelo contaminadas con crudo extrapesado y limpias, se colectaron en una zona adyacente a una fosa petrolera ubicada en el Tigre, Estado Anzoátegui (Faja Petrolífera del Orinoco-Venezuela), estas fueron preservadas a 4°C. Se realizó una estimación de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP), empleando un sistema de extracción Soxhlet con cloroformo como solvente de extracción, encontrándose que el HTP inicial de este suelo era 16.

**Preparación de las muestras de Suelo:** Se realizaron diluciones sólido-sólido (suelo impactado – suelo limpio), obteniendo tres concentraciones diferentes para cada uno de los tratamientos empleados en el ensayo experimental (Tabla I)

Tabla I Diseño experimental de las diluciones para cada tratamiento

HTP2	HTP4	HTP8
12,5% del suelo impactado con TPH16 y 87,5% del suelo limpio	25% del suelo impactado con TPH16 y 75% del suelo limpio	50% del suelo impactado con TPH 16 y 50% del suelo limpio

\* Controles + (suelo limpio) C- (suelo estéril)

**Obtención y Preparación de los esquejes de *C.zizanioides*:** Los esquejes o semillas de *C. zizanioides* se obtuvieron de tres (3) plantas nodrizas con varios esquejes, se

mantuvieron en una maceta temporal y en invernadero por tres (3) semanas para su adaptación. Posteriormente, se procedió a separar los esquejes de las plantas adultas, seleccionándose un grupo de esquejes a los cuáles se les cortaron las hojas para incrementar el desarrollo de sus raíces (Truong et al. 2008). Posteriormente, fueron trasplantados en un semillero con suelo estéril e inoculados con hongos de micorrizas arbusculares (HMA) con la finalidad de inducir la simbiosis para el bioensayo (tratamientos y los controles positivos). Los restantes fueron cultivados en suelo estéril para ser utilizados en los controles negativos.

**Inóculo de hongos de micorrizas arbusculares (HMA):** El inóculo empleado a base de HMA perteneciente a la familia de las *Glomeraceae* fue donado por el Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).

**Diseño experimental:** En el siguiente cuadro se muestra el diseño experimental del ensayo de tolerancia

**Tabla II** Diseño experimental del ensayo con sus repeticiones

Tratamientos	HTP2	HTP4	HTP8	Control +	Control -
Repeticiones	6	6	6	6	6

\*Los tratamientos y el control positivo fueron inoculados con 10gr de inóculos de HMA

Cada microcosmos se preparó utilizando 150g de la mezcla, y dos (2) esquejes por maceta. El total de individuos fue de **60** (**48** biotratamientos, 12 control positivo y **12** control negativo). La duración del bioensayo fue de 240 días durante los cuales el crecimiento de las plantas fue monitoreado constantemente, éstas se sometieron a las mismas condiciones de luz, humedad y temperatura, para disminuir las variables que pudieran afectar el crecimiento de las mismas

#### **Determinación de los parámetros asociados a las plantas y a los HMA:**

Para evaluar la asociación planta HMA se emplearon los siguientes indicadores:

**Longitud radical (cm).** Se midió la extensión de la raíz de cada esqueje por replica desde el cuello de la planta hasta el final de la raíz más extensa (Torres et al. 2010). Se midió la raíz central y dos laterales y se obtuvo la media aritmética

**Colonización micorrízica.** Las raíces secundarias finas fueron extraídas del sistema radicular de la planta fueron aclaradas con KOH 10%, acidificadas en HCl 10% y teñidas con azul de tripán (Phillips y Hayman, 1970). Se determinó la colonización micorrízica en todos los campos por réplica empleando el método de intercepción en cuadrícula (Newman, 1966), evaluando la presencia o ausencia de estructuras características de las HMA; arbusculos, vesículas, enrollados hifales e hifas (McGonigle et al, 1990).

**Análisis estadístico:** Se realizó un test de comparación de distribución normal y homoestadidad, el cual permitió corroborar que no cumplen con los supuesto del ANOVA, por tanto se aplicó una prueba no paramétrica Kruskal – Wallis ( $p < 0,05$ ). Para estos análisis de datos, se empleó el paquete estadístico PAST 326b.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente tabla I, se muestran los resultados obtenidos de los tratamientos con diferentes dosis de HTP.

**Tabla III Resultados de los parámetros medibles en la planta y asociados a los HMA**

Parámetros de la planta	HTP2	HTP4	HTP8	C+	C-
<b>LONGITUD RADICAL (cm)</b>	49,55 ± 2,44 a	60,54 ± 2,79 b	74,58 ± 1,15 c	40,29 ± 4,05 a	16,50 ± 4,39 d
<b>% LRM</b>	23,64 ± 18,66 a	10,41 ± 6,25 b	51,67 ± 10,54 c	88,08 ± 11,85 d	0

Valores promedios y desviación estándar

Test de Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ). Letras en la misma fila muestran diferencias estadísticamente significativas

Las micorrizas arbusculares se caracterizan por facilitar la toma de nutrientes indispensables para la nutrición mineral de las plantas, sobre todo en ambientes donde se presenta estrés abiótico como es la presencia de contaminantes altamente tóxicos como lo son los hidrocarburos. Los efectos positivos que presentan las plantas micorrizadas, se muestran en la medición de la longitud de las raíces en las plantas correspondiente a los tratamientos con respecto al control positivo. Existe un incremento de esta longitud en el tratamiento HTP8, seguidos por los tratamientos HTP4 y HTP2, mostrando diferencias significativas entre los tratamientos con respecto a los controles. La longitud radical es un indicador de crecimiento estimulado por la presencia de HMA, lo cual implica el aprovechamiento de nutrientes biodisponible en la matriz del suelo, ya que la planta puede explorar a través de los macro y microporos formados por la mezcla del contaminante y el suelo, por tanto al estar micorrizada la extensión de las hifas puede incorporar macro y microelementos poco disponible, ya que incrementa la superficie de absorción, favoreciendo su crecimiento y el incremento de la producción de nuevo tejido y por consiguiente beneficia la producción de biomasa y a su vez la tolerancia (Hernan et al, 2014; Vega et al, 2004). Otra ventaja de las plantas micorrizadas y cultivadas a diferentes dosis de HTP, es que no presentan lesiones foliares (clorosis), esto puede deberse a que pueden estar formándose complejos asociados a enzimas resistentes a los efectos tóxicos en la vacuola (Poschenrieder, C. and Barceló J., 2004), lo que hace un efecto de protección de los HMA a la planta.

En cuanto a la micorrización, se puede observar en la tabla III, el tratamiento con mayor porcentaje de micorrización fue el HTP8, siendo su valor cercano al control positivo,

luego el HTP2 y por último el HTP4, estos resultados mostraron diferencias estadísticamente significativa.

El género *Rizophagus*, empleado en este ensayo, tiene la particularidad de ser resistente a la presencia de hidrocarburo así como la mayoría de las familias pertenecientes a la Glomeracea, por lo tanto, los resultados indican que se logró establecer la colonización en los tratamientos con las diferentes dosis. Por otra parte, los resultados de Garcés et al. (2017) son similares a los obtenidos en este trabajo, lo que sugiere que la estrategia de pre-inocular las raíces con HMA, minimiza el efecto inhibitor del contaminante sobre las esporas y micelio de los HMA que incide en la disminución de la colonización, ya que parte de éstos se pierden por la toxicidad de los compuestos sobre los propágulos infectivos de HMA (Lenoir et al, 2016). Este ensayo demostró que la efectividad del sistema se debe al establecimiento de la simbiosis previamente, lo que induce a que la planta y el inóculo toleren las diversas dosis de HTP presentes en el suelo. Además, las esporas son estructuras de resistencia (Franco et al, 2007) por lo tanto, toleran este tipo de compuesto tóxico y la pre adaptación favorece las señales bioquímicas que se dan entre el hongo y la raíz de la planta por medio de los exudados radicales, esto es el proceso de afinidad entre los HMA y la planta hospedera (Gadkar et al, 2001; Barrer, 2009). También, puede presentarse el caso donde haya una inhibición o disminución de la colonización de los HMA a la planta, esto se debe a que pueden estar solubilizados compuestos altamente tóxicos derivados del crudo, por lo tanto, ejerce un efecto negativo sobre el crecimiento fúngico, sin embargo, se ha observado que en ausencia de exudados radicales, las esporas pueden germinar y desarrollar el tubo germinal dándose el contacto directo entre la hifa y célula epidérmica con la pared vegetal, estableciéndose la relación micorrizica funcional (Harrison, 1999; Kirk et al, 2005). Posiblemente esta es lo que puede estar sucediendo en el tratamiento HTP4, donde se registró el menor porcentaje de micorrización.

## CONCLUSIONES

El sistema Vetiver – HMA, responde favorablemente a las diferentes dosis de hidrocarburo, observándose que a pesar de que existe un ambiente tóxico por la presencia de compuestos derivados del hidrocarburo, el porcentaje de micorrización se encuentra por encima del 50% , demostrándose de esta manera que este sistema es potencialmente aplicable a suelos contaminados con crudo extrapesado.

## REFERENCIAS

Akhundova, E., Atakishiyeva, Y. Interaction between plants and biosurfactant producing microorganisms in petroleum contaminated absheron soils. *Phytoremediation for Green Energy*, de M. Ashraf, A. Aksoy, y M. S. A. Ahmad M. Ozturk. New York: Springer Dordrecht, (2015).



- Alisi, C., Musella, R., Tasso, F., Ubaldi, C., Manzo, S., Cremisini, C., y Sprocati, A. Bioremediation of diesel oil in a co-contaminated soil by bioaugmentation with a microbial formula tailored with native strains selected for heavy metals resistance. *Science of the Total Environment*, (2009).
- Barrer, S.. El Uso De Hongos Micorrizicos Arbusculares Como Una Alternativa Para La Agricultura. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*. 7(1). Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n1/v7n1a14.pdf> (2009)
- Brandt, R., Merkl, N., Schultze, R. and Infante C. Potential of vetiver ( L. Nash) for phytoremediation of hydrocarbon contaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation*,(8),273-284. (2006).
- Brundrett, M., y Tedersoo, L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220(4), 1108-1114. doi: 10.1111/nph.14976 (2018).
- Delon, F. Hidrocarburos origen y acumulación. Petróleos de Venezuela, SA. Programa de educación petrolera. Litografía Beta. 14.(2001).
- Decreto 2635 Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos (Gaceta Oficial Extraordinaria No 5245 del 3 de agosto de 1998) (1998)
- Franco, A, Ferrera, R, Varela, L, Pérez, J, y Alarcón, A.. Arbuscular mycorrhizal fungi in chronically petroleum-contaminated soils in Mexico and the beffects of petroleum hydrocarbons on sporegermination. *Journa lof Basic Microbiology*, 47(5), 378–383. doi: 10.1002/jobm.200610293. (2007)
- Gao, Y., Li, Q., Ling, W., y Zhu, X. Arbuscular mycorrhizal phytoremediation of soils contaminated with phenanthrene and pyrene. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2–3), 703–709. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.09.076 (2011)
- Garcés, M, Senés, C, Declerck, S, y Cranenbrouck, S. Arbuscular mycorrhizal fungal community composition in *Carludovica palmata*, *Costusscaber* and *Euterpe precatoria* from weathere doil ponds in the Ecuadorian Amazon. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1–13. doi: 10.3389/fmicb.2017.0213. (2017).
- Gadkar, V, David-Schwartz, R, Kunik, T, y Kapulnik, Y. Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization. Factors Involved in Host Recognition. *Plant Physiology*, 127, 1493–1499. doi: 10.1104/pp.010783.vitro(2001).
- 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)

- Grimshaw, R. G. An Introduction to Vetiver Grass Technology. *The Vetiver Network*,: 1–15. (2014)
- Harrison, M. Molecular and cellular aspects of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50, 361–389. doi: 10.1146/annurev.arplant.50.1.361 (1999).
- Hernan V,B, Medina, M.E, Cumbal, L, Villarroel, A. Implementación de un banco de Hongos Micorrízicos Arbusculares, aislados de suelos del área de influencia de EP PETROCUADOR y su efecto en el desarrollo de plantas de Maíz (*Zea mays*) en condiciones de estrés por cadmio, en La Joya de los Sachas, Provincia de Orellana-Ecuador. IX CONGRESO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPE. (2014)
- Hernández, I. and Mager, D. Uso de *Panicum maximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar suelos contaminados con un crudo de petróleo liviano. *Bioagro*, 15 (3), 149-155. (2003).
- Ismail, Y., McCormick, S., and Hijri, M. A fungal symbiont of plant-roots modulates mycotoxin gene expression in the pathogen *Fusarium sambucinum*. *PLoS ONE* 6:e17990. doi: 10.1371/journal.pone.0017990 (2011)
- Kirk, J, Moutoglis, P, Klironomos, J, Lee, H, y Trevors, J. Toxicity of diesel fuel to germination, growth and colonization of *Glomus intraradices* in soil and in vitro transformed carrotroot cultures. *Plant and Soil*, 270(1), 23–30. doi: 10.1007/s11104-004-1013-x(2005).
- Lenoir, I, Lounés-Hadj, A, Laruelle, F, Dalpé, Y, y Fontaine, J. Arbuscular mycorrhizal wheat inoculation promotes alkane and polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation: Microcosm experiment on aged-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 213, 549–560. doi: 10.1016/j.envpol.2016.02.056 (2016)
- Liao, J., Wang, J., y Huang, Y. Bacterial community features are shaped by geographic location, physicochemical properties, and oil contamination of soil in main oil fields of 52 china. *Microbial Ecology*, 70(2), 380–389. doi: 10.1007/s00248-015-0572. (2015)
- Liu, A., y Dalpé, Y. Reduction in soil polycyclic aromatic hydrocarbons by arbuscular mycorrhizal leek plants. *International Journal of Phytoremediation*, 11(1), 39–52. doi: 10.1080/15226510802363444. (2009)
- Mcgonigle, T, Miller, H, Evans, D, Fairchild, L, Swan. J. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular—arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*. Volume115, Issue3. (1990)

- Meharg, A. The potential for utilizing mycorrhizal associations in soil bioremediation. *Fungi in Bioremediation*, de G. Gadd, pp 45–455. Cambridge: Cambridge University Press, (2018).
- Merkl, N., Schultze, R. and Infante C. Phytoremediation of petroleumcontaminated soils in the tropics- pre-selection of plant species from eastern Venezuela. *Journal of Applied Botany and Food Quality*,(78),185-192. (2004).
- Mogrovejo A, M.P. Degradación de hidrocarburos con hongos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus irregularis* y una cepa nativa proveniente de la Amazonía Ecuatoriana asociados a pasto RyeGrass (*Lolium multiflorum*). Tesis de Grado, Quito: Pontificia Universidad Católica de Ecuador 70. (2019).
- Newman, E.I. A Method of Estimating the Total Length of Root in a Sample. *Journal of Applied Ecology*, 3, 139-145. <http://dx.doi.org/10.2307/2401670> (1966)
- Pagano, M., Oehl, F., Silva, G., Maia, L., Silva, D., y Cabello, M. Advances in Arbuscular Mycorrhizal Taxonomy. En M. Pagano, Recent Advances on Mycorrhizal Fungi (pp. 15–22). doi: 10.1007/978-3-319-24355-9. (2016)
- Pinchin, H., Williams, J., May, E., Mant, C., y Hodkinson, B.. In Situ and microcosm investigations into the phytoremediation of hydrocarbon-contaminated lagoon sediments using *Phragmitesaustralis*. *Journal of Environmental Engineering*, 139(4), 488–495. doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000591 (2013)
- Phillips J. & Hayman D.. Improved procedures for clearing roots and vesicular-arbuscular fungi for rapid assessment of the infection. *Transactions of the British Mycological Society*. 55: 158-161. (1970)
- Poschenrieder, C. y Barceló, J. Estrés por Metales Pesados de *Ecofisiología Vegetal: una Ciencia de Síntesis*, Thomson. pp.413-429. (2004)
- Prasad, M.N., Freitas, H., Fraenzle, S., Wuenschmann, S and Markert, B. Knowledge explosion in phytotechnologies for environmental solutions. *Environ Pollut*. 158(1):18–23. (2010)
- Rajtor, M and Piotrowska, S. Prospects for arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to assist in phytoremediation of soil hydrocarbon contaminants. *Chemosphere*: 105-16. (2016)
- Rodriguez, J y Sánchez, J. Biorremediación: Fundamentos y aspectos microbiológicos. *Industria y minería*. (351):12-6. (2003)
- Rosales, Y., Acosta, Y., El Zuahre, M., Mogollon, P and Zamora, F. Parámetros agronómicos en pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* L) cultivado sobre un aridisol impactado con lodo petrolizado y tratado con compost. *REDIELUZ* 5 (1,2). 38-42 (2015)

- Rosas, J. Aplicación del Vetiver y las micorrizas arbusculares como una estrategia de recuperación de suelos marginales. Edo Miranda-Venezuela. Escuela de Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela (2008)
- Smith, S., y Read, D.. Mycorrhizal Symbiosis. Elsevier. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/book/9780123705266/mycorrhizal-symbiosis>. (2008)
- Shan, B., Zhang, Y., Cao, Q., Kang, Z., Li, S. Growth responses of six leguminous plants adaptable in Northern Shaanxi to petroleum contaminated soil. *Environmental Science*: 1125-1130. (2014)
- Torres, D, Cumana, A, Torrealba, O, and Posada, D. Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(2), 175-188. (2010)
- Truong, P. N. La tecnología del pasto vetiver para protección ambiental.(1999). En: [http://www.vetiver.org/lavn\\_prot%20amb.html](http://www.vetiver.org/lavn_prot%20amb.html).
- Vega, G, León, A, Jiménez, Y, Carreón y Martínez, M. Efecto de las micorrizas arbusculares en el crecimiento de plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum*) en suelos contamiados con aluminio. Resúmenes del IV Symposium nacional y II simposium iberoamericano de la simbiosis micorrízica, p.60, (2004)
- Wang, S., Xu, Y., Lin, Z., Zhang, J., Norbu, N., y Liu, W..The harm of petroleum-polluted soil and its remediation research.AIP Conference Proceedings, 1864(1).doi: 10.1063/1.4993039. (2017)
- Xu Y, Lu M. Bioremediation of crude oil-contaminated soil: comparison of different biostimulation and bioaugmentation treatments. *J Hazard Mater*. Nov 15;183(1-3):395-401.(2010)
- Zhu, H., Liu K., Yang X., Liu, Q.. Sedimentary controls on the sequence stratigraphic architecture in intracratonic basins: an example from the Lower Permian Shanxi 58 Formation, Ordos Basin, Northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 45, 42-54. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2013.04.017 (2013)

# VARIACIÓN ESTACIONAL Y RESPUESTA FRENTE A EVENTOS DE TORMENTA DE LAS PLAYAS DEL PARTIDO DE VILLA GESELL, BUENOS AIRES, ARGENTINA

Leonardo Sánchez-Caro <sup>a,b</sup>; Pedro A. Garzo <sup>b,c,d</sup>; Germán R. Bértola <sup>b,c,d</sup>

<sup>a</sup>Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (UNLP - CONICET), Argentina

<sup>b</sup>Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

<sup>c</sup>Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (UNMDP - CIC), Argentina

<sup>d</sup>Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (CONICET - UNMDP), Argentina

e-mail: [leonardo.sanchezcaro@gmail.com](mailto:leonardo.sanchezcaro@gmail.com)

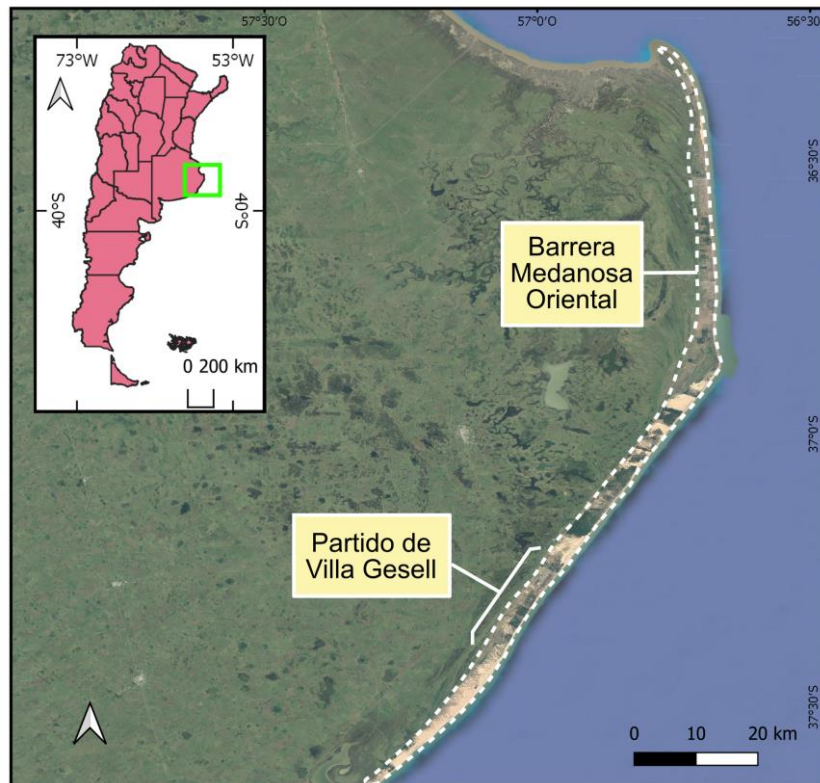
## RESUMEN

*El turismo de sol y playa constituye la base de la actividad económica del partido de Villa Gesell, ubicado en el sector septentrional de la costa marítima bonaerense. Las variaciones climáticas estacionales condicionan la extensión de las playas utilizables para la actividad turística. A su vez, este sector de costas abiertas se ve afectado por eventos de tormenta que pueden modificar sustancialmente los perfiles de playa. En el presente trabajo se caracterizó la variación estacional de las playas del partido de Villa Gesell, así como su respuesta a eventos de tormenta. Se utilizaron datos de perfiles de playa y balances sedimentarios relevados entre 1994 y 2010, de cuatro playas ubicadas en zonas urbanas y periurbanas. Estos perfiles fueron retomados en marzo y julio de 2021, en éste último caso, con relevamientos antes y después de dos tormentas que afectaron las costas de la zona. Las playas ubicadas en zonas urbanas (localidad de Villa Gesell), donde la duna costera ha sido deteriorada o completamente eliminada producto del avance urbano turístico, presentaron menores anchos y menores pendientes. Por el contrario, las playas de zonas periurbanas (localidades de Mar Azul y Mar de las Pampas) presentaron mayores anchos y pendientes, así como mayor variabilidad en sus balances sedimentarios. La estación climática de mayor pendiente fue variable entre los distintos perfiles. La tormenta con viento sudoeste (subparalelo a la costa) del mes de julio ocasionó una importante remoción de arena de la playa frontal, mientras que la tormenta con viento sudeste (desde el mar), ocurrida diez días después, incidió también en la playa distal. Deben desarrollarse pautas de manejo que apunten a atenuar el proceso de erosión costera, especialmente en las playas de la zona central de Villa Gesell.*

Palabras Clave: Erosión costera, Sudestadas, Perfiles de playa.

## INTRODUCCIÓN

La Barrera Medanososa Oriental de la Provincia de Buenos Aires constituye un cordón arenoso que se extiende en sentido NNE-SSW desde Punta Rasa hasta la Laguna de Mar Chiquita (ver Fig. 1). Desarrollada con posterioridad a la fluctuación holocena del nivel del mar (Violante y Parker, 1993), comprende depósitos de dunas y playas que ocupan un ancho de costa variable de hasta 5 km (Isla, 2017).



**Figura 1.** Barrera Medanosa Oriental de la Provincia de Buenos Aires, y ubicación del área de estudio.

El partido de Villa Gesell, ubicado sobre la Barrera Medanosa Oriental, 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 mineralógicamente 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 topográficamente inferiores y un aumento de la selección hacia la playa frontal (Bértola, 2006). Spalletti y Mazzoni (1979) registraron sutiles cambios regionales en lo referente a los minerales pesados.

Los vientos más frecuentes provienen del norte, en tanto que los más intensos son los del sudeste, sur y sudoeste.

El régimen de mareas es diurno, con una amplitud media de sicigias de 0,74 m. La onda de marea se propaga desde el sur, a una velocidad de 0,13 m/h, lo cual depende en gran medida de los vientos (SHN, 2021). El aporte de arena a la playa por deriva litoral ocurre desde el sur, con un valor promedio de 400.000 m<sup>3</sup>/año. Este valor puede aumentar hasta 700.000 m<sup>3</sup>/año durante los eventos de sudestada, que causan importantes daños a la infraestructura litoral (Verón y Bértola, 2014). De acuerdo con observaciones visuales

realizadas en la localidad de Pinamar, vecina a la zona de estudio, la altura de ola promedio es de 0,89 m (máxima de 2,30 m), su período promedio es de 8,7 s (de 7 a 14 s) y la rompiente preponderante es del tipo de volteo (Lanfredi et al., 1992).

Las playas de Villa Gesell, naturalmente disipativas, se han transformado en un sector de playas con mayor energía y, por ende, reflectivas a partir de las afecciones antrópicas (Bértola, 2006). En las localidades de Mar Azul y Mar de las Pampas se han observado procesos de erosión generalizada (Isla et al., 1998). Asimismo, Isla et al. (2018) han estimado una evolución de la línea de costa que responde a un proceso erosivo con un ritmo de retroceso de 0,4 a 0,7 m/año para este municipio.

El partido de Villa Gesell cuenta con cuatro localidades: Villa Gesell (cabecera del partido), Mar de Las Pampas, Las Gaviotas y Mar Azul (ver Fig. 2). Desde mediados del siglo pasado, el auge del turismo de sol y playa promovió el crecimiento de las urbanizaciones costeras, previa estabilización del sustrato arenoso mediante la implantación de especies leñosas exóticas de crecimiento rápido (Juárez e Isla, 1999). La forestación antrópica generó una disminución en la disponibilidad de arena, alterando la morfología original y el equilibrio sedimentario playa-médano e induciendo problemas de erosión costera (Isla et al., 1998). A su vez, Rodrigues Capítulo et al., (2018) han evaluado el impacto negativo de la implantación de especies alóctonas sobre el ciclo hidrológico en el Partido de Pinamar.

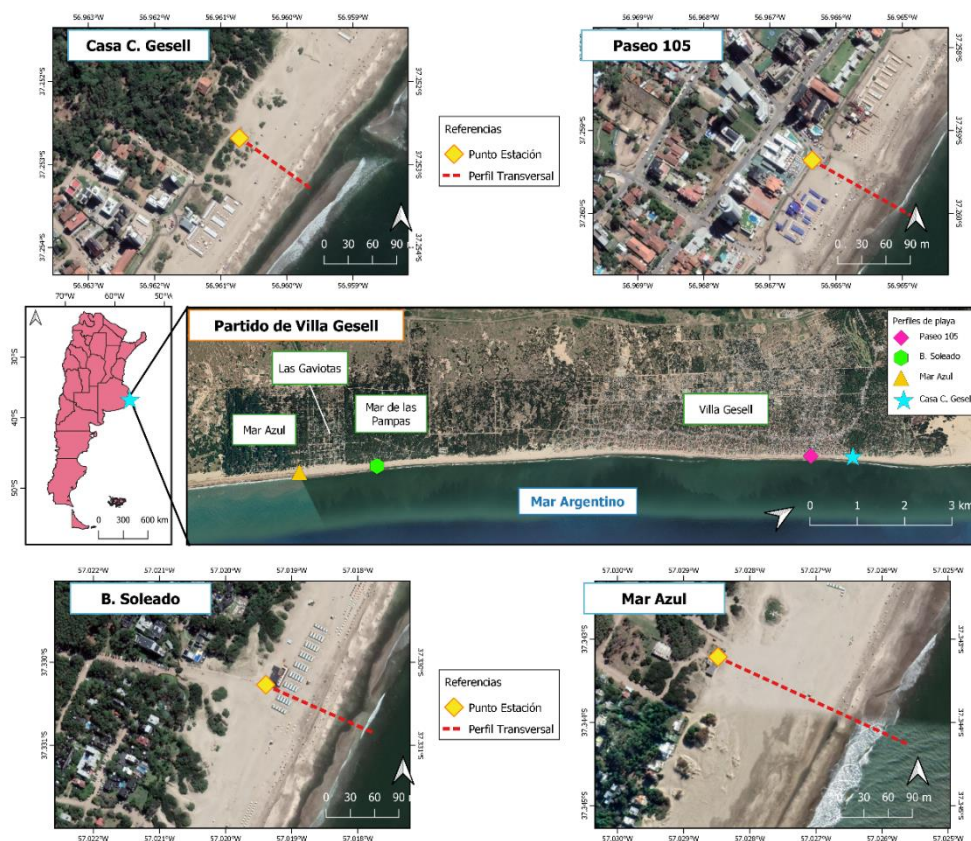
Estas localidades han desarrollado un patrón de avance urbano atípico debido a su rápido crecimiento vinculado al turismo, con calles trazadas sobre las depresiones intermedanas y la implantación de coberturas urbanas impermeables sobre el suelo arenoso costero (Isla et al., 1998). Este tipo de cambios en la cobertura ha promovido incrementos de la escorrentía superficial, la generación de nuevas zonas de erosión a partir de desagües pluviales hacia la costa y la disminución en la recarga de los acuíferos superficiales en el partido de La Costa (Carretero y Kruse, 2014), que comparte las características geomorfológicas, geológicas y climáticas del partido de Villa Gesell.

Las ciudades costeras orientadas al turismo de sol y playa presentan una estratificación urbana muy marcada, con franjas paralelas a la costa donde se diferencian usos, actividades e infraestructura balnearia, entre otras (Dadon, 1999). La localidad de Villa Gesell, a diferencia de las restantes, 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).

En el presente trabajo se caracterizó la variación estacional de las playas del partido de Villa Gesell, así como su respuesta a eventos de tormenta. Para ello se seleccionaron cuatro sectores de playas correspondientes a entornos urbanos y periurbanos, con distinto grado de alteración en las localidades de Villa Gesell, Mar de las Pampas y Mar Azul. Los resultados de este trabajo representan el punto de partida para la realización de un plan de manejo costero en el municipio de Villa Gesell.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo relevamientos topográficos a partir de perfiles de playa en cuatro puntos del Partido de Villa Gesell (ver Fig. 2), dos de ellos ubicados en la cabecera del Partido, y los dos restantes en las localidades de Mar Azul y Mar de las Pampas. Los datos fueron relevados entre los años 1994 y 2021. De 1994 a 1999 los perfiles fueron realizados con frecuencia cuatrimestral, mientras que entre 2000 y 2010 de forma anual o bianual. Por último, se realizaron dos campañas en marzo y julio de 2021. En esta última campaña se registraron perfiles previamente a una tormenta de viento sudoeste (paralelo a la costa), posteriormente a esta tormenta, y finalmente luego de una segunda tormenta, en este caso con viento de dirección sudeste (proveniente del mar).



**Figura 2.** Ubicación de los perfiles realizados en el Partido de Villa Gesell.



Todos los perfiles fueron realizados transversalmente a la playa desde un punto fijo georreferenciado (o Punto Estación), tomando cotas cada 5 m, hasta unos 0,5 m de profundidad durante bajamares. Se estimó el volumen sedimentario de cada playa según la Ec. (1):

$$\text{Vol playa} = \Sigma [\text{Cota} * 50 \text{ m} * 5 \text{ m}] \quad (1)$$

Donde el volumen de playa es igual a la sumatoria para todos los puntos equidistantes del producto de la cota del punto n, la distancia del radio de influencia del perfil considerada (arbitrariamente 50 m; 25 m a cada lado) y la distancia entre el punto n y el punto n+1 (5 m). Finalmente se obtuvieron los balances sedimentarios a partir de la diferencia entre los volúmenes de un relevamiento y el anterior.

Se estimó la pendiente porcentual de cada perfil de playa según la Ec. (2):

$$\text{P\%} = [\text{cota PE} - \text{cota PF}] / L \quad (2)$$

Donde PE es la cota del Punto Estación, PF la cota del punto final del perfil y L la longitud del mismo. A su vez, se estimó la pendiente porcentual de la playa frontal considerando la misma expresión, pero comprendida entre la cota del punto de pleamar (berma de mareas) y la cota del punto final, sobre la distancia entre ambos.

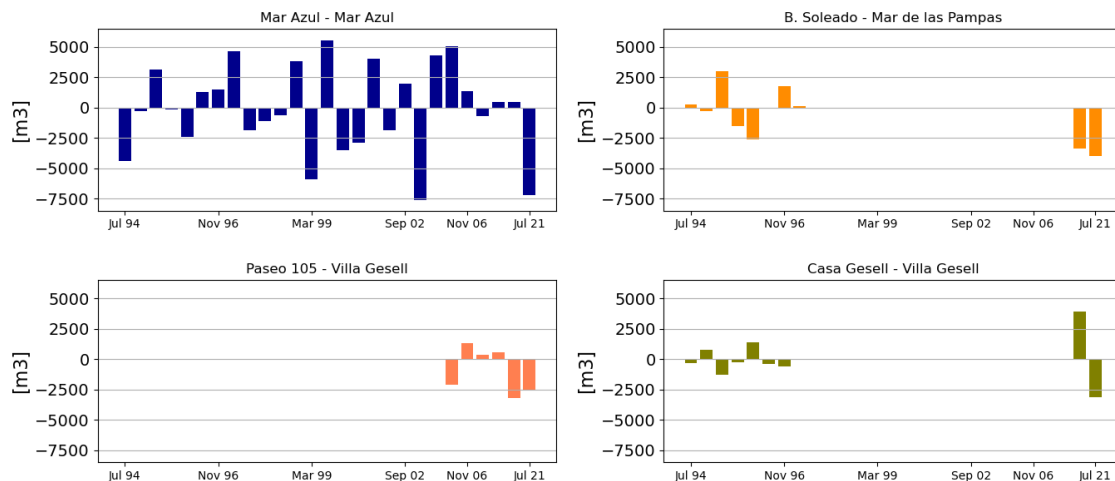
De cada perfil se obtuvieron muestras superficiales (no más de 3 cm de profundidad) de sedimento de la playa distal (comprendida entre la berma de mareas y el médano), la playa frontal y del médano. Los sedimentos fueron tamizados en laboratorio cada 0,5 unidades phi, para obtener los parámetros estadísticos según Folk y Ward (1957). A partir de la superposición de los perfiles relevados se obtuvieron series de erosión-depositación, mientras que de su comparación se determinaron los desplazamientos netos del material (sentido y volumen de transporte).

## RESULTADOS

Se obtuvieron los parámetros estadísticos correspondientes al balance sedimentario, ancho de playa, pendiente total y pendiente de playa frontal obtenidos en los cuatro perfiles bajo estudio (Tabla I). Asimismo, se obtuvo la evolución temporal del balance sedimentario (ver Fig. 3) y la sumatoria y promedios por estación climática para cada perfil en el período 1994-2021 (Tabla II). Para algunos períodos, se observa simultáneamente erosión en algunos perfiles y acumulación en otros. Esto responde a la presencia de bancos submareales que afectan la dinámica de estas playas por efectos de refracción y difracción diferencial, causando que, en pocos cientos de metros, existan episodios de acumulación o erosión bajo los efectos de una misma tormenta (Bértola, 2006).

Tabla I. Pendiente de la playa frontal y del total de la playa, ancho de playa y balance sedimentario de los cuatro perfiles analizados.

		<b>Mar Azul</b>	<b>B. Soleado</b>	<b>Paseo 105</b>	<b>Casa Gesell</b>
<b>Pendiente Total de la Playa [%]</b>	<b>Media</b>	3,21	5,15	4,13	5,15
	<b>Mediana</b>	3,02	5,00	4,35	4,93
	<b>Máximo</b>	7,17	6,39	5,43	7,34
	<b>Mínimo</b>	1,08	4,33	2,82	3,07
	<b>Desv. Est.</b>	1,02	0,67	0,88	1,19
<b>Pendiente de la Playa Frontal [%]</b>	<b>Media</b>	6,99	7,21	4,32	7,71
	<b>Mediana</b>	7,10	7,29	4,15	8,48
	<b>Máximo</b>	13,00	12,12	6,10	12,54
	<b>Mínimo</b>	2,47	2,44	2,90	2,33
	<b>Desv. Est.</b>	2,87	2,80	1,17	3,23
<b>Ancho de Playa [m]</b>	<b>Máximo</b>	120,00	150,00	90,00	105,00
	<b>Mínimo</b>	45,00	55,00	35,00	50,00
	<b>Media</b>	79,09	88,04	65,00	71,25
	<b>Desv. Est.</b>	37,50	47,50	27,50	27,50
<b>Balance Sedimentario [m3]</b>	<b>Máximo</b>	5538,67	3016,90	1300,00	3940,75
	<b>Mínimo</b>	-7609,60	-4008,00	-3172,25	-3108,00
	<b>Media</b>	-229,43	-668,00	-944,00	18,00
	<b>Desv. Est.</b>	3582,00	2117,00	1733,00	1656,00



**Figura 3.** Evolución temporal de los balances sedimentarios para los cuatro perfiles de estudio

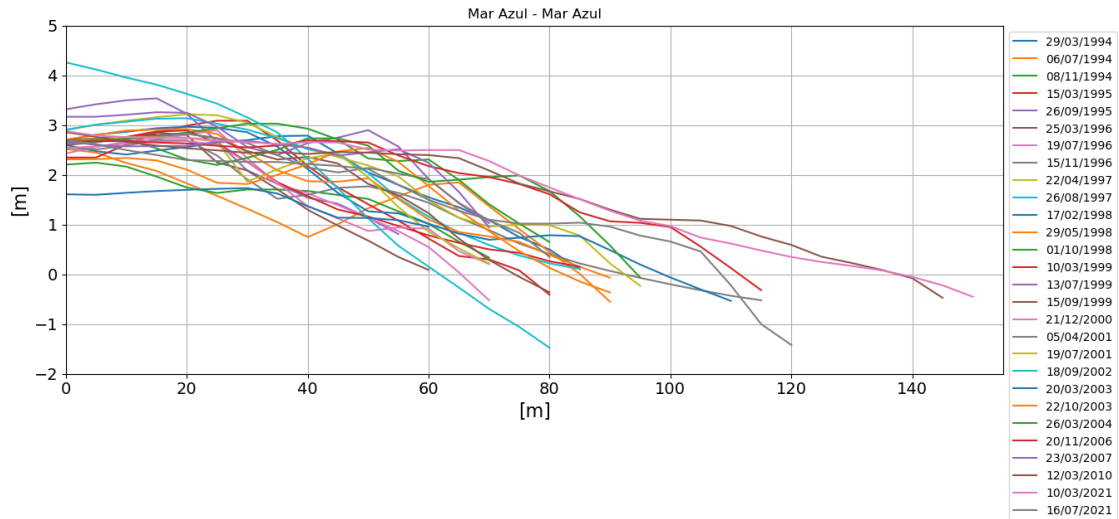
Tabla II. Sumatoria de los balances sedimentarios y promedios por estación climática para los cuatro perfiles

		<b>Mar Azul</b>	<b>B. Soleado</b>	<b>Paseo 105</b>	<b>Casa Gesell</b>
<b>Sumatoria de balances sedimentarios por estación climática [m³]</b>	<b>Total</b>	-3212,00	-6880,50	-5663,75	198,97
	<b>Invierno</b>	-7391,75	-3760,89	-2618,00	-1275,23
	<b>Primavera</b>	4501,97	-1500,85	Sin datos	-107,00
	<b>Verano</b>	-362,27	1497,61	1300,00	108,00
	<b>Otoño</b>	40,05	-2916,38	-1086,40	804,50
<b>Balances sedimentarios promedio por estación climática [m³]</b>	<b>Invierno</b>	-1231,96	-1253,63	-2618,00	-3825,70
	<b>Primavera</b>	750,3	-1500,80	Sin datos	-213,93
	<b>Verano</b>	-90,6	748,80	1300,00	216,06
	<b>Otoño</b>	3,3	-583,30	-4345,75	4022,55

### Perfil Mar Azul (Mar Azul)

El ancho de la playa medio se estimó en 86 m (con desvío de +/- 47 m), de los cuales los primeros metros, fuertemente antropizados por la construcción de un balneario, y los últimos, fueron los que tuvieron mayor variabilidad topográfica. En relación a la pendiente de la playa, siempre fue mayor en la playa frontal y con mayores cambios en los sucesivos relevamientos que en el total del perfil (Figura 4). Los valores arrojaron una media de 3,21% en la pendiente general de la playa (máximo: 7,2% y mínimo: 1,1%) y una media de 6,8% en la pendiente de la playa frontal (máximo: 13% y mínimo: 2,5%). En relación a los balances entre 1998 al 2003 las variaciones fueron muy marcadas, para

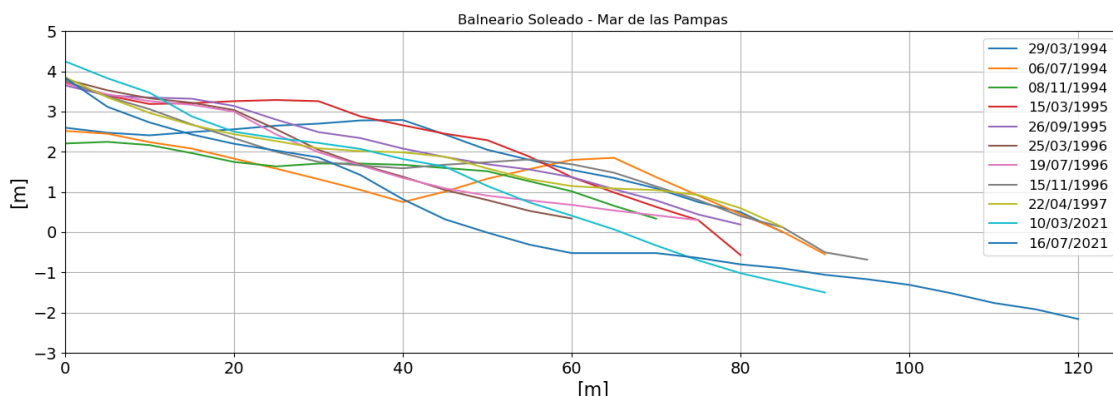
luego amortiguarse en los restantes años analizados. El perfil de invierno de 2021 presentó un balance sedimentario significativamente negativo respecto del realizado en otoño del mismo año. En general se aprecia una pérdida de arena de casi 3200 m<sup>3</sup> en 26 años de mediciones. Se destaca a la primavera como la estación acumulativa y al invierno como la época con mayores pérdidas para este perfil.



**Figura 4.** Perfiles de playa para el sector Mar Azul, localidad de Mar Azul

#### **Perfil Balneario Soleado (Mar de las Pampas)**

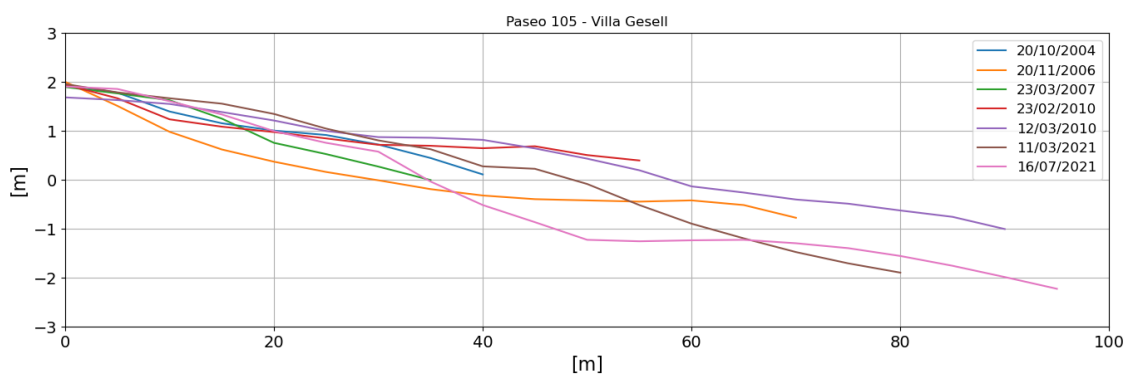
El ancho de la playa se estimó en aproximadamente 75 m (con desvío de +/- 25 m), con la mayor variabilidad topográfica comprendida entre los 30 y 60 m del perfil (Figura 5). La pendiente de la playa, siempre fue mayor en la playa frontal y con mayores cambios en los sucesivos relevamientos que en el total del perfil. Los valores arrojaron una media de 5,2% en la pendiente general de la playa (máximo: 6,4% y mínimo: 4,3%) y una media de 7,5% en la pendiente de la playa frontal (máximo: 12,1% y mínimo: 2,4%). Los balances sedimentarios entre 1994 y 1995 presentaron variaciones muy marcadas, mientras que para el año 2021 se observaron pérdidas en ambos relevamientos. Se estimó una pérdida neta de sedimentos de 2600 m<sup>3</sup> para el período de estudio. Asimismo, el verano fue identificado como la estación acumulativa y el invierno como la estación con mayores pérdidas.



**Figura 5.** Perfiles de playa para el sector Balneario Soleado, localidad de Mar de las Pampas.

### Perfil Paseo 105 (Villa Gesell)

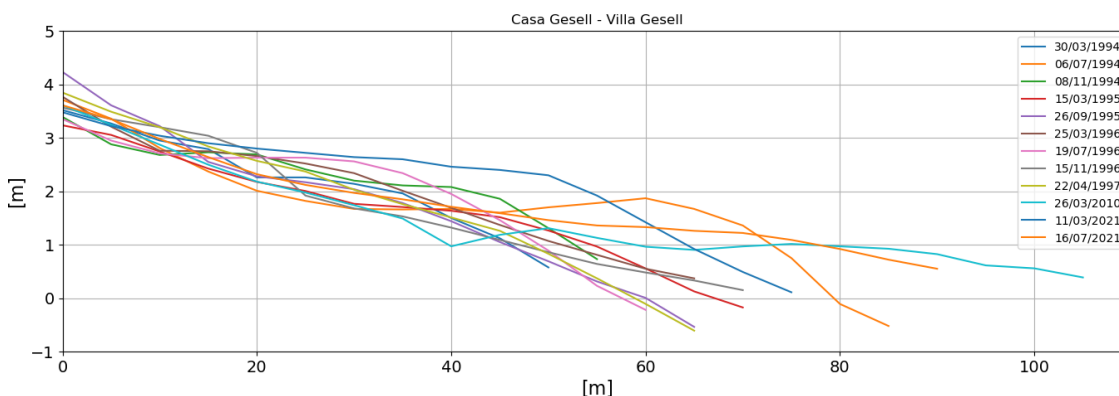
El ancho de la playa se estimó en aproximadamente 61 m (con desvío de +/- 27 m), con la mayor variabilidad topográfica comprendida entre los 25 y 50 m del perfil (Figura 6). Se obtuvieron pendientes semejantes en la playa frontal y en el total del perfil. Los valores arrojaron una media de 4,1% en la pendiente general de la playa (máximo: 5,4% y mínimo: 2,8%) y una media de 4,4% en la pendiente de la playa frontal (máximo: 6,1% y mínimo: 2,9%). Los primeros relevamientos y los últimos presentaron la mayor variabilidad volumétrica, con una pérdida de más de 3000 m<sup>3</sup> en los 16 años de mediciones. Para el año 2021 se presentaron balances negativos en ambos relevamientos. Es importante destacar que este perfil, siendo el ubicado en la zona céntrica y más urbanizada del partido, se encuentra a menos de 20 m de un aliviador pluvial construido a fines de 1998. Se destaca al verano como la estación climática acumulativa y al invierno como aquella con mayores pérdidas sedimentarias.



**Figura 6.** Perfiles de playa para el sector Paseo 105, localidad de Villa Gesell.

## Perfil Casa Carlos Gesell (Villa Gesell)

El ancho de la playa se estimó en casi 70 m (con desvío de +/- 27 m), con la mayor variabilidad topográfica comprendida entre los 40 y 60 m del perfil. La pendiente siempre fue mayor en la playa frontal que en el total del perfil (Figura 7). Se estimó una media de 5,3% en la pendiente general de la playa (máximo: 7,3% y mínimo: 3,1%) y una media de 8,1% en la pendiente de la playa frontal (máximo: 12,5% y mínimo: 2,3%). El relevamiento correspondiente al otoño de 2021 fue el que presentó la mayor variabilidad volumétrica de la serie, con una pérdida neta de más de 3000 m<sup>3</sup>. Hasta el año 2004 se emplazaba una construcción correspondiente a un balneario en la zona del médano, la cual fue demolida por finalizar su contrato de concesión. El verano es la estación acumulativa más destacada, mientras que el invierno es aquella con mayores pérdidas sedimentaria.



**Figura 7.** Perfiles de playa para el sector Casa Gesell, localidad de Villa Gesell.

Del análisis de los resultados obtenidos se destaca que el ancho promedio de las playas no supera los 87 m. Las playas de la localidad de Villa Gesell, donde la urbanización es más densa y las zonas de médanos han sido deterioradas o eliminadas producto de la colonización urbana, presentan los menores anchos de playa del municipio, siendo la correspondiente a la Paseo 105 la menor de ellas. Las playas del sur del partido, más agrestes y con una menor ocupación edilicia sobre el frente costero, presentan los mayores anchos de playa, así como la mayor variabilidad respecto de su balance sedimentario y volúmenes de playa. Es importante destacar que las playas relevadas son abiertas, sin estructuras de defensa costera ni infraestructura de magnitud que impida el transporte sedimentario propio de la deriva litoral.

Se cuantificó para todo el municipio una acumulación neta de 1.600 m<sup>3</sup> de arena durante casi 28 años de relevamientos. Se observaron ciclos de erosión y depositación a lo largo del año, en correspondencia con las variaciones estacionales. Los mayores volúmenes transportados de la serie fueron registrados en el perfil Mar Azul (13.148 m<sup>3</sup>), en tanto que las menores variaciones en Paseo 105 (4.472 m<sup>3</sup>).

Las menores pendientes de playa se han registrado en el Paseo 105, mientras que las mayores para el perfil de Mar Azul. Para este último, se identificaron las mayores pendientes durante el invierno y la primavera, mientras que para el Balneario Soleado los mayores valores de pendiente se han dado entre el verano y el otoño. El Paseo 105 no registró variaciones estacionales en cuanto a sus pendientes y Casa Gesell mostró los mayores valores de pendiente durante el invierno.

En general, el ancho de playa ha tenido un incremento sostenido en todos los puntos relevados, más allá de las variaciones estacionales observadas. Para los cuatro sitios, el verano es la estación climática que presentó las playas más anchas. La época otoño/invierno se relaciona con períodos mayormente erosivos, mientras que verano/otoño aparece como la época de recuperación de las playas. Durante los períodos invierno/primavera y primavera/otoño los balances no indicaron tendencias netas erosivas ni acumulativas dominantes.

Se detectaron dos alteraciones antrópicas principales en los cuatro sitios de playa analizados a lo largo del municipio. Por un lado, la canalización de caudales en episodios de tormenta por medio de desagües pluviales hacia los sectores de playa genera zonas de erosión (ver Fig. 8). Las calles transversales a la costa, hoy asfaltadas o consolidadas, fueron trazadas sobre antiguas depresiones y lagunas intermedanasas. De esta manera, las intensas lluvias de verano se encauzan por estas arterias, provocando canales y escarpas en los sectores de playa. En el año 1998, la municipalidad de Villa Gesell construyó disipadores de la escorrentía con el objetivo de minimizar los efectos erosivos originados por los desagües pluviales.

Por otro lado, los movimientos de arena son comunes y muy frecuentes en estas playas. Los concesionarios de balnearios y la municipalidad utilizan la topografía de las bermas, nivelando las playas con maquinaria pesada durante el inicio de la temporada estival. Se busca obtener la menor pendiente de playa posible, con el objetivo de ubicar las diferentes atracciones y actividades vinculadas al turismo de sol y playa. Muchas veces se explotan médanos cercanos para compensar la falta de arena. De esta manera, las zonas de préstamo son susceptibles de sufrir erosión por causas no naturales.



**Figura 8.** Desagüe pluvial hacia la playa en la localidad de Villa Gesell.

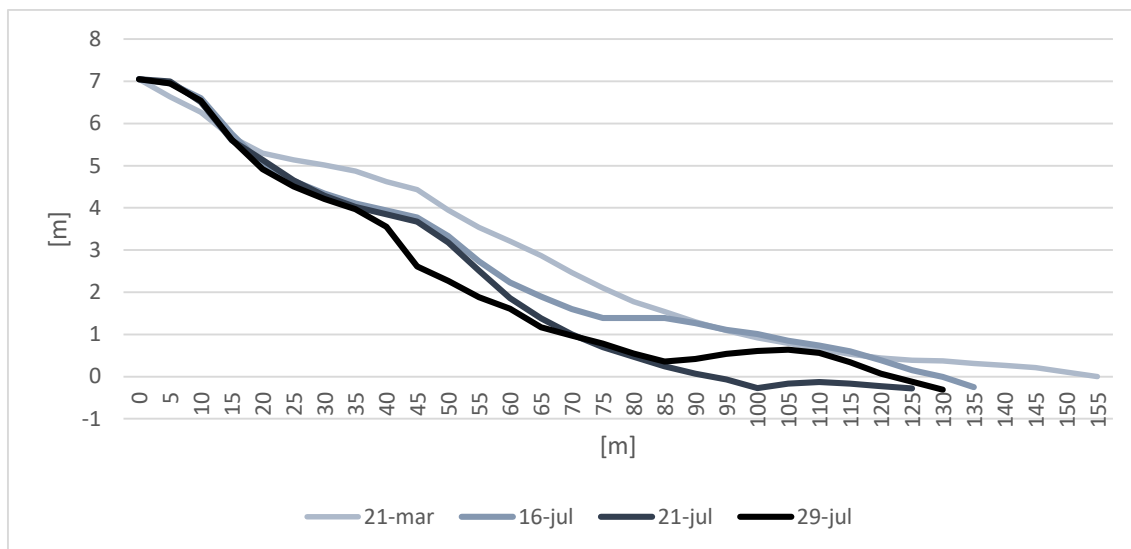
De los muestreos realizados se obtuvieron granulometrías arenosas desde finas a gruesas (Tabla III). Las más gruesas se identificaron en la playa frontal del perfil Casa Gesell, en tanto que las más finas fueron halladas a lo largo de todo el perfil Balneario Soleado. La selección fue, en general, moderada. Se observó una buena selección en la zona de médano del Balneario Soleado y una pobre selección en la playa distal de Mar Azul. La asimetría fue casi en su totalidad negativa, con un sólo valor de sesgo positivo en la zona de médano del perfil de Mar Azul.

Tabla III. Resultados de los análisis granulométricos.

		<b>Mediana (Phi)</b>	<b>Media (Phi)</b>	<b>Selección</b>	<b>Asimetría</b>
<b>Casa C. Gesell</b>	Playa Distal	1,9	1,8	0,63	-0,21
	Playa Frontal	0,4	0,4	0,81	-0,03
<b>Calle 105</b>	Playa Distal	1,7	1,6	0,87	-0,18
	Playa Frontal	1,5	1,5	0,66	-0,01
<b>Soleado</b>	Playa Distal	2,0	2,0	0,52	-0,62
	Playa Frontal	2,0	1,9	0,54	-0,11
	Médano	2,4	2,4	0,35	-0,02
<b>Mar Azul</b>	Playa Distal	1,1	1,0	1,22	-0,08
	Playa Frontal	1,4	1,3	0,74	-0,16
	Médano	1,6	1,7	0,49	0,16

Los cuatro puntos de medición mostraron el mismo patrón de variaciones frente a las tormentas ocurridas en julio de 2021. A modo de ejemplo, la Fig. 9 muestra el perfil de playa antes, entremedio y después (16, 21 y 29 de julio respectivamente) de las tormentas para el perfil Soleado, en Mar de las Pampas, así como el correspondiente al del 21 de marzo, que se consideró línea de base para establecer comparaciones. El análisis de los perfiles muestra el efecto diferencial de las tormentas sobre el perfil de playa, según la dirección de incidencia de los vientos. La tormenta con viento sudoeste, aproximadamente paralelo a la costa, removi6 gran cantidad de sedimento en la playa frontal, afectando incluso la berma de mareas. La tormenta posterior, con viento sudeste, afect6 m6s fuertemente la playa distal. Por otro lado, se registr6 depositaci6n en la playa frontal.





**Figura 9.** Perfiles pre-, entre y post-tormentas en Balneario Soleado, Mar de las Pampas.

La erosión del sector costero sur de Villa Gesell ha sido explicada por fenómenos de canibalización de la barrera medanosa original. Esta erosión de viejos depósitos litorales permite que se mantenga la provisión de sedimento a la deriva (Isla, 1997). Los sobrelavados inducidos por tormentas se acumularían en las depresiones intermedanasas.

Los problemas litorales inducidos por la estabilización de médanos costeros han sido extensamente estudiados. La erosión de la barrera arenosa de los Outer Banks ha sido atribuida a la estabilización de médanos en gran escala (Dolan y Lins, 1987). Estos programas causaron un angostamiento de la playa activa y un aumento del perfil de la playa (Fischer et al., 1986). En Algoa Bay (Port Elizabeth, Sudáfrica), la erosión costera aumentó debido a la estabilización de los médanos y obras de defensa que alteraron el transporte litoral (Illenberger, 1993). En la costa de Sefton (Inglaterra), la demanda de sitios de recreación y la falta de métodos paliativos han causado la destrucción de la vegetación de los médanos litorales y el desarrollo de extensos “blowouts”. Esto ha causado que la arena se mueva preferentemente hacia el interior y así aumenten los problemas de retroceso costero (Pye y Neal, 1994). En Dinamarca, la sobreforestación ha provocado significativas disminuciones de los volúmenes transportados por deriva. Tal es este efecto que se ha evaluado la deforestación de zonas con pinos para ser recuperadas como áreas naturales y de valor paisajístico (Jensen, 1994).

Si bien las forestaciones inducidas han provocado una disminución en la disponibilidad de arena y problemas de erosión costera en Villa Gesell (Isla et al., 1998), la aplicación de medidas como la deforestación puede resultar inviable. Los médanos forestados tienen un valor paisajístico muy importante para este municipio, siendo valorados como patrimonio de la comunidad e incluso encontrándose muy arraigados como parte de la identidad cultural local (Dadon, 2002). Es menester prever y considerar la expansión de los bosques por fuera de los límites estrictos de las localidades a partir de su capacidad

de dispersión (Faggi y Dadon, 2010). Esta creciente fijación de los médanos costeros podría tener impactos negativos sobre la dinámica litoral de las playas del partido, siempre que no haya una gestión adecuada del ambiente. A partir de los resultados del presente trabajo se pretende fortalecer directamente aquellos aspectos vinculados a la información y el conocimiento de las playas del municipio. A la vez, se busca aportar indirectamente a algunos instrumentos operativos como lo es el Plan Estratégico Villa Gesell (MVG – UNLP, 2002), el cual busca promover la implementación de medidas de preservación del frente costero y el sostenimiento del cordón dunícola.

## **CONCLUSIONES**

El ancho promedio de las playas relevadas no supera los 87 metros. Las playas de la localidad de Villa Gesell, con mayores niveles de urbanización, presentan los menores anchos del municipio, siendo la de Paseo 105 la menor de ellas. Las playas de Mar Azul y Mar de las Pampas (periurbanas) presentaron mayores anchos de playa y mayor variabilidad en sus balances sedimentarios.

Las menores pendientes de playa se registraron para el Paseo 105, mientras que las mayores para Mar Azul. Los perfiles presentaron variaciones en sus pendientes respecto de la estación climática y cada perfil presentó una estación climática distinta con valores máximos de pendiente.

El análisis de los balances sedimentarios de cuatro las playas del partido de Villa Gesell permitió reconocer la existencia de zonas con diferente dinámica, con una distancia relativamente corta entre estos puntos.

Se han podido identificar como procesos modificadores de estas playas a los ciclos estacionales invierno/verano, a los ciclos episódicos de tormentas y a la acción antrópica (urbanización, forestaciones inducidas, desagües pluviales hacia sectores de playa y cambios artificiales en los perfiles de playa). El primero de ellos se evidencia mediante la recuperación sedimentaria de las playas en verano y la pérdida durante el invierno.

El Paseo 105, ubicado en la zona céntrica de Villa Gesell, presenta un problema erosivo generalizado, originado por el drenaje de los desagües pluviales hacia la playa. Mientras tanto, el perfil Casa Gesell, ubicado en un sector cercano al anterior, mantiene un médano frontal aún activo y en él se registró una leve acumulación sedimentaria.

Pudieron identificarse efectos diferenciales de las tormentas sobre el perfil de playa en los cuatro puntos de medición, según el sentido de incidencia de los vientos. Las tormentas con viento sudoeste provocan pérdidas sedimentarias principalmente en la playa frontal, mientras que en las de viento sudeste la erosión se extiende hacia la playa distal.

Es menester considerar los impactos a la dinámica litoral y en la distribución de arenas hacia el interior de la barrera de las futuras forestaciones costeras. Es recomendable

especialmente impedir la expansión de los bosques hacia el sur de la zona de estudio ya que se promovería la fijación de dunas en la dirección de la cual proviene la deriva litoral, pudiendo impactar negativamente en los balances sedimentarios de las playas de todo el municipio.

## REFERENCIAS

- Bértola, G., Farenga, M., Fernández, J., Taverna, B., Antenucci, D. y Del Río, J. (2020). Aprovechamiento sustentable de áridos dunarios en el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires. En Actas del XII Congreso Argentino de Geología Económica. De Barrio (ed). CABA. Asociación Argentina de Geólogos Economistas (AAGE).
- Bertola, G. R., Isla, F. I., Cortizo, L. C., y Turno Orellano, H. (2002). Modelo sedimentario de la barrera medanosa al norte de Villa Gesell (provincia de Buenos Aires)-de aplicación hidrogeológica.
- 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.
- Carretero, S., y Kruse, E. (2014). Impacto de la urbanización en la infiltración en un área costera, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), 5-24.
- 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.
- Fisher, J.S., Overton, M.F. y Chisholm, T.. (1986). Field measurements of dune erosion. *Proceedings of the 20th Coastal Engineering Conference, ASCE*. 1. 1107-1115.
- Dadon, J. R. (1999). Gestión de sistemas con baja biodiversidad: Las playas arenosas del Noreste de la provincia de Buenos Aires. En: Matteucci, S.D., Solari, O.T., Morello J. y Halffter, G. (Eds.). *Biodiversidad y uso de la tierra. Conceptos y ejemplos de Latinoamérica*. Buenos Aires: EUDEBA-UNESCO, 529-548.
- 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.
- Dolan, R., y Lins, H. (1987). Beaches and barrier islands. *Scientific American*, 257(1), 68-77.
- Faggi, A. M. y Dadon, J. (2010). Vegetation changes associated to coastal tourist urbanizations. *Multequina*, 19, 53-75.
- Folk, R. L., y Ward, W. C. (1957). Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of sedimentary research*, 27(1), 3-26.
- Illenberger, W. K. (1993). Variations of sediment dynamics in Algoa Bay during the Holocene. *South African Journal of Science*, 89(4), 187-196.
- Isla, F., Bértola, G. R., Farenga, M., Serra, S., y Cortizo, L. C. (1998). Villa Gesell: un desequilibrio sedimentario inducido por fijaciones de médanos. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 5, 41-51.
- Isla, F. I., Cortizo, L., Merlotto, A., Bértola, G., Albisetti, M. P., y Finocchietti, C. (2018). Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited. *Ocean & Coastal Management*, 156, 107-116.
- Isla, F. I., Cortizo, L. C., & Schnack, E. J. (1996). Pleistocene and Holocene beaches and estuaries along the Southern Barrier of Buenos Aires, Argentina. *Quaternary Science Reviews*, 15(8-9), 833-841.
- 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.

- Jensen, F. (1994). Dune management in Denmark: application of the nature protection act of 1992. *Journal of Coastal Research*, 263-269.
- Juárez, V., e Isla, F. (1999). Evolución histórica del núcleo urbano de Villa Gesell. *Revista Geográfica*, 49- 60.
- Lanfredi, N. W., Pousa, J. L., Mazio, C. A., y Dragani, W. C. (1992). Wave-power potential along the coast of the province of Buenos Aires, Argentina. *Energy*, 17(11), 997-1006.
- Pye, K., y Neal, A. (1994). Coastal dune erosion at Formby Point, north Merseyside, England: causes and mechanisms. *Marine Geology*, 119(1-2), 39-56.
- Rodríguez Capítulo, L., Carretero, S. C., y Kruse, E. E. (2018). Impact of afforestation on coastal aquifer recharge. Case study: eastern coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environmental earth sciences*, 77(3), 74.
- SHN (2021). Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina. Previsiones de mareas.
- Spalletti, L. A., y Mazzoni, M. M. (1979). Caracteres granulométricos de arenas de playa frontal, playa distal y médano litoral atlántico bonaerense. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 34(1), 12-30.
- Verón, M. J., y Bértola, G. R. (2014). Aplicación del método de flujo de energía en el litoral de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*, 21(1), 17-23.
- Violante, R. A., y Parker, G. (1993). Evidencias de una ingresión marina intercalada entre el Interensenadense y el Belgranense (" Pampeano") en las áreas costeras y marinas del noreste bonaerense. En XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 252-259.

# PREDICCIÓN DE DAM EN MINERAL DE ESCOMBRERA UTILIZANDO DOS MÉTODOS ESTÁTICOS

Ana A. Senese<sup>a</sup>, Luis Gutierrez<sup>a</sup>, Mariel M. Negrelli<sup>a</sup>, Natalia Hidalgo<sup>a</sup> y Maximiliano Moreno<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Investigaciones Mineras, FI, Universidad de San Juan, ARGENTINA.

<sup>b</sup>Departamento de Minas, FI, Universidad de San Juan, ARGENTINA.

e-mail: [asenese@unsj.edu.ar](mailto:asenese@unsj.edu.ar)

## RESUMEN

*El drenaje ácido es el resultado de la oxidación natural de minerales sulfurados contenidos en rocas, siendo uno de los principales la pirita, que han sido expuestos a la humedad y condiciones oxidantes, lo que genera una reducción del pH del agua de infiltración y lixiviación de metales. El objetivo del presente trabajo es detectar y evaluar la posible generación de ácido por parte del material de escombrera, aplicando dos métodos estáticos y su posterior comparación. Los métodos estáticos son la primera fuente para poder determinar el potencial generador de ácido o potencial neutralizador de un material; un conjunto de análisis y pruebas que proveen información rápida de las características geoquímicas y la reactividad de los minerales. Para lograr este objetivo se estudiaron dos muestras provenientes de una escombrera ubicada en la bajada del río Huerta de Huachi (Jáchal, San Juan) denominada como ME-1 y ME-2, las cuales se caracterizaron por medio de análisis químicos, pruebas de solubilidad y estudio mineralógicos. Los métodos de comparación usados para la predicción de generación ácida fueron los métodos ABA y NAG. El método ABA consiste en la determinación de la cantidad de carbonato equivalente y azufre lixiviable de una sustancia sólida. Lo anterior se traduce en la determinación del potencial ácido y el potencial de neutralización de una muestra. El test NAG entrega inmediatamente el resultado neto o total de la generación de ácido. Como resultado de la aplicación de ambos métodos estáticos de las dos muestras estudiadas, la muestra ME-1 resultó generadora de ácido; esto se condice con el análisis mineralógico que indicaron que la pirita está mayoritariamente en estado libre y ausencia de minerales alcalinizantes; mientras en la muestra ME-2 no se observaron sulfuros. Concluyendo que los test ABA y NAG arrojaron resultados similares para las dos muestras.*

Palabras Clave: Sulfuros, pH, Escombrera, Metales, Pirita.

## INTRODUCCIÓN

La industria minera ha evolucionado considerablemente a tal grado de ser una de las actividades potencialmente más rentables. No obstante, está ligada a la producción de residuos sólidos, líquidos y gaseosos que han provocado impactos significativos sobre el suelo, aire y aguas subterráneas (Valencia F. T. and Songor L. A, 2020). Se considera al drenaje ácido de mina como la responsabilidad ambiental y económica más grande que actualmente afronta la industria minera.

Su desarrollo puede tomar años o décadas, y puede continuar durante siglos. En los últimos 15 años, la tecnología ha desarrollado rápidamente, hasta el punto que se pueden tomar medidas razonables como parte del programa de diseño y desarrollo de mina para identificar y controlar el drenaje ácido. Actualmente la minería a cielo abierto es una de las más factibles y comúnmente la más utilizada, sin embargo producen un

gran impacto medioambiental (Volke T. and Velasco J. A. 2002). El material estéril de mina es depositado en terrenos donde se encuentra en contacto con la atmósfera y el agua; la presencia conjunta de estos elementos favorece el proceso de oxidación de los minerales sulfurosos y la presencia de ciertas bacterias pueden acelerar la formación de drenaje ácido de roca (Natarajan K. A., 2008). Los sulfuros metálicos en su estado original (en las profundidades de la tierra) son minerales estables que no representan un peligro para el ambiente; pero cuando el hombre los extrae y los pone en contacto con el intemperismo se oxidan, proceso mediante el cual adquieren una coloración amarillo-rojiza que es característica del hierro oxidado (Postgate J. R., 1965). Siendo una de las características más importantes de los DAM, una vez generados el proceso de formación es cíclico e irreversible hasta tanto no sea eliminado uno de los principales agentes que lo causan (Aduvire O., 2006). El drenaje ácido se puede definir como resultado de la oxidación natural de minerales sulfurados contenidos en las rocas principalmente pirita que han sido expuestos al aire y al agua lo que genera una reducción del pH del agua de infiltración y lixiviación de metales (Chaparro L. T., 2006). Los sulfuros, especialmente la pirita reacciona con el oxígeno para formar sulfato de hierro ferroso e iones hidrógeno (Dold B., 2010).

## **MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL**

El primer paso fue identificar zonas de muestreo de escombreras, siguiendo la regla de extracción adecuada para que las muestras fueran representativas.

Las muestras fueron extraídas por personal técnico de la Universidad Nacional de San Juan (Facultad de Ingeniería de Minas). Se tomaron muestras de una escombrera ubicada en la bajada del río Huerta de Huachi (Departamento Jáchal, provincia de San Juan). Las dos muestras identificadas como ME-1 Y ME-2 se llevaron a un tamaño de partícula inferior de 0,125 mm.

Cada una de las muestras fue sometida al proceso de preparación y molienda. Se redujeron a menos 1 pulgada en trituradora de mandíbulas, las que posteriormente fueron cuarteadas. Una de las fracciones se redujo a más 1/4 de pulgada en una trituradora de mandíbulas y molino de rolos. Se realizaron sucesivos cuarteos con el objeto de obtener muestras representativas para ser enviadas al laboratorio químico, mineralógico y posteriormente llevar a cabo los dos ensayos estáticos y su posterior comparación.

### **Análisis químico**

La composición química de cada muestra sólida fue analizada por medio de un equipo de plasma de acoplamiento inductivo (ICP). Además se determinó el porcentaje de azufre total (horno de Inducción LECO), y el porcentaje de SiO<sub>2</sub> a través de análisis gravimétrico. Los carbonatos fueron determinados por pérdida por calcinación, el Hg por vapor frío y el As en horno de grafito.

### **Análisis mineralógico**

Se realizó la descripción mineralógica mediante observaciones con lupa binocular. Las observaciones fueron realizadas con la lupa binocular LEICA S6D STEREO MICROSCOPE (10X-64 X), provisto de una cámara de video Leica DFC 295 incorporada y monitor de alta resolución, con su correspondiente programa computarizado para tratamiento de imágenes.

## Ensayo de solubilidad

Se realizó la prueba del frasco agitado (volumen 1.000 ml), la cual se ve reflejada en la Fig.1. La prueba se detalla a continuación:

- Se colocaron cada una de las muestras tomando una porción representativa del mineral en un recipiente, se añadió agua destilada en una relación de 3:1 agua / sólidos en peso (w/w) para garantizar que no haya limitaciones de solubilidad y que se puedan disolver todos los productos solubles.
- Luego se colocó el recipiente en un extractor rotativo (Fig.1), el cual fue construido por el investigador Mg. Ing. Luis Gutierrez en el taller local del I.I.M. con pautas de diseño avaladas por la experiencia con el objetivo que la carga mineral se agite sin producir centrifugación es decir alcanzar una agitación eficiente para que las partículas permanezcan en contacto durante 24 horas de forma suave para garantizar una exposición continua de todas las superficies.
- Tras la agitación se dejaron las muestras por un mínimo de 3 horas para garantizar que las partículas en suspensión puedan sedimentar. Luego se recolectó la solución sobrenadante la cual se analizó por pH y una serie de metales disueltos.



Figura 1. Ensayo de solubilidad de las muestras en estudio llevado a cabo en el extractor rotativo.

## Ensayos estáticos

Con el tiempo los minerales al ser expuestos al agua y al aire se comportan de manera distinta, unos como productores de ácido y otros como neutralizantes. Con estos valores se puede predecir la calidad del agua y por ende el potencial ácido/base. Los ensayos estáticos se basan en la evaluación del balance entre el potencial de generación ácida (oxidación de minerales sulfurosos) y la capacidad de neutralización ácida (disolución de carbonatos y otros minerales que aportan alcalinidad). Estos ensayos no predicen el rango de generación ácida sólo indican el potencial de generación ácida. Comparado con los ensayos dinámicos son más rápidos y menos costosos.

- 1- En los *ensayos estáticos ABA*, se consideraron los siguientes factores:
- ✓ % S: contenido total de azufre y las especies sulfurosas en las muestras en estudio. El azufre total se analizó utilizando un horno Leco.
  - ✓ pH en pasta
  - ✓ Máximo potencial de producción ácida o potencial de acidez (PA. Acid Potential).
  - ✓ Máximo potencial de neutralización (PN. Neutralizing Potential).
  - ✓ El potencial neto de neutralización (PNN) mide la acidez o basicidad de una muestra y se obtiene por diferencia entre el potencial de neutralización (PN) o alcalinidad total y el potencial de acidez (PA) o acidez total ( $PNN = PN - PA$ ).
  - ✓ Grado de generación ácida (PN/PA)

#### *Porcentaje de sulfuro*

Se determinó el porcentaje de azufre como sulfuro, como la diferencia entre el azufre total y el azufre como sulfato.

#### *pH en pasta*

El pH en pasta es un indicador de la acidez total almacenada en la muestra, así como la extensión en la que ha ocurrido la oxidación antes de un análisis más acabado. Se determinó pesando 150 g. de mineral triturado a -4 mm. convenientemente cuarteado. Se procedió a saturar 150 g. de muestra con agua destilada la cual fue añadida a la muestra sin agitar. Se dejó reposar durante una hora, luego se agitó la muestra y se ajustó hasta lograr una consistencia pastosa agregando más agua destilada (el agua no debe empozarse en la superficie ni debe aparecer material seco). Luego se midió el pH de pasta a las 24, 48 y 120 h. a cada una de las muestras; insertando un electrodo de pH combinado en el líquido sobrenadante de la pasta. A continuación, se puede observar el acondicionamiento de las muestras para posterior medición de pH en pasta en la Fig. 2

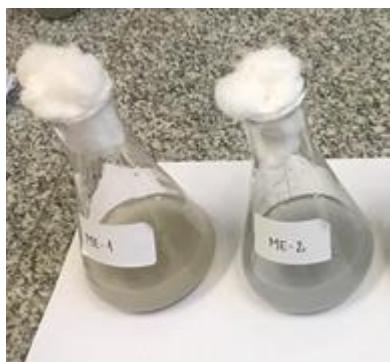
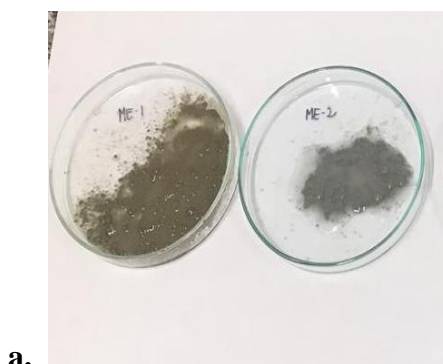


Figura 2. Muestras acondicionadas para su posterior medición de pH en pasta.

#### *Cálculo del Potencial de Neutralización (PN)*

La medición del potencial de neutralización (PN) consistió en la aplicación del método ABA (Aduvire O., 2018). El PN es una medida del material carbonatado disponible para neutralizar el ácido y su valor es determinado agregando ácido a una muestra la cual es titulada por una base (NaOH) para determinar la cantidad de ácido consumido. Se observan las diferentes etapas para la determinación del PN en la Fig.3.

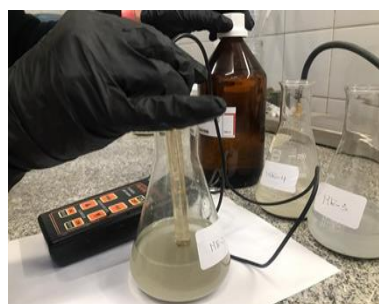




a.



b.



c.

**Figura 3.** a. Determinación del grado de efervescencia utilizando HCL b. Agitación de las muestras durante 24 horas en el agitador orbital. c. Medición de pH para posterior titulación con NaOH.

#### *Cálculo del Potencial Ácido (PA)*

Para calcular el PA se utilizó el % de azufre como sulfuros multiplicados por el factor 31.25 para convertirlo a equivalentes de carbonato de calcio (t/t de mineral). Esto permitió una comparación directa con los análisis del PN. “Ver Ec. (1)”

$$\text{PA (Potencial Ácido): } \% S_{\text{sulfuros}} \times 31.25 \quad (1)$$

Nota: las unidades de PN, PA y PNN se suelen expresar en t CaCO<sub>3</sub> / 1.000 t. de material.

#### *Grado de generación ácida (PN/PA)*

La relación PN/PA se utilizó para evaluar también la predicción ácida de las dos muestras en estudio. Un valor de esta relación mayor a 3 se considera que la muestra no presenta potencial de generación ácida. En la tabla I se muestran los criterios utilizados de evaluación para la predicción ácida.

Tabla I. Criterios de evaluación para la predicción ácida tomado de MEM (Ministerio de energía y Minas) 1995. Guía Ambiental Para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.

Potencial de Generación de aguas ácidas	PNN (t CaCO <sub>3</sub> / 1.000 t material)	Relación PN/PA
No tiene	> + 20	> 3.0
Incierto	- 20 < X < +20	1.0 < X < 3.0
Probable	< - 20	< 1.0

2- Ensayo estático **NAG**, consiste en entregar rápidamente el resultado neto o total de generación ácido. Se basa en la adicción de peróxido de hidrógeno a la muestra. La finalidad es oxidar los sulfuros con el peróxido de Hidrógeno. El ácido sulfúrico generado es totalmente o parcialmente neutralizado por los componentes de la misma muestra. La Prueba consiste en agregar 250 ml. de peróxido de hidrógeno al 15 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 2,5 gramos de muestra, esto se deja hasta que la efervescencia cese (en caso que exista) para obtener el residuo ácido. A la solución remanente se le toma el pH. Los resultados se resumen en la Tabla II.

Tabla II. Clasificación resultados NAG.

pH NAG	Observación
> 4,5	No es potencial generador ácido (NPGA)
< 4,5	Es potencial generador ácido (PGA)

Luego si el pH NAG es < 4,5, se titula la solución con NaOH, posteriormente se registra el volumen añadido. , “ver Ec. (2)”

$$NAG = 49 \times V * M / W \quad (2)$$

Siendo,

V: Volumen de NaOH utilizado para titular hasta pH 4,5 (ml.)

M: Concentración molar de NaOH utilizado para titular (moles/litro)

W: Peso de la muestra (g.)

Las unidades de NAG son Kg. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/ t

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis Químico

En la tabla III se puede observar los elementos químicos presentes en las muestras ME-1 y ME-2.

Tabla III. Datos de algunos elementos obtenidos por ICP y % de azufre se determinó por horno de inducción Leco.

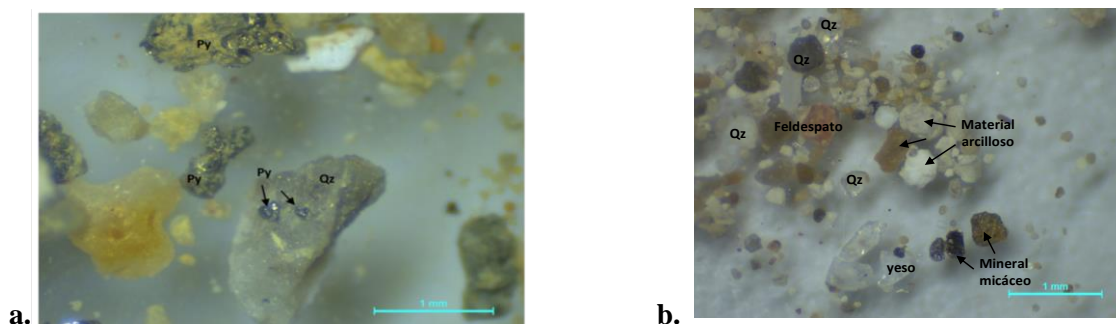
Muestras	As ug/g	B ug/g	Ba ug/g	Ca ug/g	Cu ug/g	Fe ug/g	Mg ug/g	Mn ug/g	Na ug/g	Zn ug/g	S %	SO <sub>4</sub> %
ME-1	255,6	N/D	627,4	22930	186,7	62580	12960	497	7244	114	2,79	2,28
ME-2	70,52	374,9	298,7	8391	22,6	13180	2706	420	3213	37	0,64	0,03

\* Hg, Bi, Cd, Co, Cr, Ga, In, Li, Ni, P, Pb, Sn, Sr, Ti, TL, V no fueron detectable (N/D) en las muestras analizadas ME-1. ME-2. Referencia:  $\mu\text{g/g}=\text{mg/Kg}$ .

Los valores de As en las dos muestras (255,6  $\mu\text{g/g}$  para ME-1 y 70,52  $\mu\text{g/g}$  para ME-2) exceden el valor permitido para uso tanto agrícola como industrial (20  $\mu\text{g/g}$  es lo permitido para uso agrícola y 50  $\mu\text{g/g}$  para uso industrial) según establece la Ley 24.585 de Protección Ambiental para la actividad minera (Carrascosa H., 2000). Los valores para el B para la muestra ME-2 (374,9  $\mu\text{g/g}$ ) excede el valor permitido para uso agrícola según la ley el cual es aceptable hasta un valor de 2  $\mu\text{g/g}$ . El porcentaje de azufre total en la muestra ME-1 es alto en comparación con el valor de la muestra ME-2.

### Análisis mineralógico

A continuación se observan especies mineralógicas presentes en las muestras ME-1 y ME-2, Fig.4 a. y b. respectivamente.



**Figura 4.a.** Pirita (Py) libre y en cuarzo (Qz). **b.** Se observó una marcada efervescencia al agregado de CIH, lo que indica que la muestra posee pátinas y/o agregados de material carbonático.

### Ensayo de solubilidad

La tabla IV expresa los valores de elementos químicos resultantes de la prueba de solubilidad de las muestras ME-1 y ME-2.

Tabla IV. Valores obtenidos de elementos químicos obtenidos de la prueba de solubilidad realizados en las muestras ME-1 y ME-2.

Fecha de análisis		07/09/21	07/09/21	LC	LDI	Método	Ley 24585 Anexo IV			
ID Muestra		4724	4725				Niveles Guía de Calidad de Agua			
Metales	Unidades						Unidades	Tabla 1	Tabla 2	Tabla 5
Aluminio	mg/l	9,750	0,709	0,005	0,0005	SM-3120-B	µg/l	200	-	5000
Arsénico	mg/l	n.d.	0,044	0,04	0,004	SM-3120-B	µg/l	50	50	100
Antimonio	mg/l	< LC	n.d.	0,03	0,003	SM-3120-B	µg/l	10	16	-
Bario	mg/l	n.d.	n.d.	0,0001	0,00001	SM-3120-B	µg/l	1000	-	-
Berilio	mg/l	1,110	0,029	0,0002	0,00002	SM-3120-B	µg/l	0.039	-	-
Boro	mg/l	< LC	0,183	0,05	0,005	SM-3120-B	µg/l	-	750	500
Cadmio	mg/l	0,023	0,004	0,001	0,0001	SM-3120-B	µg/l	5	0.2	10
Cinc	mg/l	1,050	n.d.	0,002	0,0002	SM-3120-B	µg/l	5000	30	2000
Cobalto	mg/l	0,042	n.d.	0,002	0,0002	SM-3120-B	µg/l	-	-	50
Cobre	mg/l	1,110	0,028	0,004	0,0004	SM-3120-B	µg/l	1000	2	200
Cromo	mg/l	n.d.	n.d.	0,003	0,0003	SM-3120-B	µg/l	50	2	100
Manganeso	mg/l	4,230	0,060	0,0003	0,00003	SM-3120-B	µg/l	-	100	-
Molibdeno	mg/l	n.d.	0,041	0,005	0,0005	SM-3120-B	µg/l	-	-	10
Níquel	mg/l	0,021	n.d.	0,003	0,0003	SM-3120-B	µg/l	25	25	200
Plomo	mg/l	n.d.	n.d.	0,02	0,002	SM-3120-B	µg/l	50	1	200
Selenio	mg/l	n.d.	n.d.	0,04	0,004	SM-3120-B	µg/l	10	-	20
Vanadio	mg/l	n.d.	n.d.	0,002	0,0002	SM-3120-B	µg/l	-	-	-

La identificación de la muestra 4.724 y 4.725 en la tabla anterior equivalen a la identificación de las muestras ME-1 y ME-2 respectivamente en estudio.

Los datos arrojados en el ensayo anterior comprueba que no hay solubilización de metales pesados (Pb, Ni, Cr, etc.) ya que no se detectan valores de estos en los líquidos analizados. Se observa que los valores del Berilio en la Muestra ME-1 se encuentran excediendo los valores permitidos como fuentes de agua para bebida humana (Ley 24.585).

### Ensayos Estáticos

- Los resultados del **test ABA** obtenidos mediante los ensayos estáticos de las muestras ME-1 y ME-2 se detallan la Tabla V.

Tabla V. Parámetros obtenidos del Test ABA en las muestras ME-1 y ME-2, los cuales predicen si las muestras en estudio son o no generadoras de ácido.

Muestras	S Total (%)	S Sulfatos %	S Sulfuros %	PA	PN	PNN	PN/PA	M. NAG Kg. Ácido/t	pH Pasta	Generador ácido
ME-1	2,79	2,28	0,51	15,94	2,5	-13,44	0,16	23	3,02	probable
ME-2	0,64	0,03	0,61	19,06	16,75	-2,31	1	pH > 4,5	8,19	No generador

De acuerdo con el análisis de la Tabla V, en la muestra ME-1 el valor de PNN es mayor a -20, pero la relación PN/PA es menor a 1, es decir que sería PROBABLE generadora de ácido debido al bajo poder de neutralización, mientras que la muestra ME-2 por su valor de PNN, que se encuentra entre  $-20 < X < +20$ , y la relación PN/PA es igual a 1, es decir que sería INCIERTA generadora de ácido. La muestra ME-2 al tener un valor de PN/PA igual a uno indica una situación de cierto equilibrio en la posibilidad de generación ácida (Plante et al, 2014).

- El resultado del ensayo estático **NAG** (Villanueva D., 2019) se muestra a continuación:

La muestra ME-1 resultó ser generadora de ácido (pH: 2,42) como resultado de este método, en cambio la muestra ME-2 arrojó un resultado no generadora de ácido (pH: 6,23)

## CONCLUSIONES

1. Los valores de **As** en las dos muestras (255,6 µg/g para ME-1 y 70,52 µg/g para ME-2) exceden el valor permitido para uso tanto agrícola como industrial (20 µg/g es lo permitido para uso agrícola y 50 µg/g para uso industrial) según establece la Ley 24.585 de Protección Ambiental para la actividad minera. Los valores para el **B** para la muestra ME-2 (374,9 µg/g) excede el valor permitido para uso agrícola según la ley el cual es aceptable hasta un valor de 2 µg/g. Se observó en los ensayos de solubilidad no existe solubilización de metales pesados (Pb, Ni, Cr, etc.), excepto los valores de **Be** en la Muestra ME-1 que se encuentra excediendo los valores permitidos por la Ley 24.585, pero no sería tan peligroso como pueden ser otros metales.
2. La aplicación de ambos métodos estáticos en las dos muestras estudiadas, indicaron que la muestra ME-1 resultó generadora de ácido como resultado de ambos métodos; esto se condice con el análisis mineralógico que indicaron que la pirita está mayoritariamente en estado libre y ausencia de minerales alcalinizantes; mientras en la muestra ME-2, el método ABA indica un potencial incierto de generación ácida y el método NAG arroja que no es generadora de drenaje ácido, se observa que la Muestra ME-2 contiene un bajo porcentaje de pirita, pero si material carbonático, por lo cual se puede definir que sea una muestra no generadora de ácido. Para un estudio más preciso se recomienda llevar a cabo un estudio dinámico (celdas húmedas) para ambas muestras.

## REFERENCIAS

- Aduvire, O. *Plan de cierre y tratamiento de aguas ácidas mina*, Instituto de Capacitación Minera del Perú, Lima, (2006).
- Aduvire, O. Técnicas de prevención y control de la generación ácida en minería, *Rev. Mamym* 4, .24-31 (2018).
- Carrascosa, H. *Marco jurídico ambiental para la actividad minera*, Subsecretaría de minería, San Juan, Argentina 2000.
- Chaparro, L. T. Drenajes ácidos de mina. Formación y manejo, *Revista ESAICA* 1, 53-57, (2015).
- Dold, B. Basic Concepts of environmental geochemistry of sulfide mine waste, *Mineralogía y Geoquímica Ambiental Mineras*, 37, (2010).
- Natarajan, K. A. Microbial aspects of acid mine drainage and its bioremediation, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 18, 1352-1360 ( 2008).
- Plante, B., Bussière, B., and Benzaazoua B., Lab to fiel scale effects on contaminated neutral drainage prediction from the tio mine waste rocks, *J. Geochem. Explor* 137, 37- 47 (2014).

- Postgate, J. R. Recent advances in the study of the sulfate-reducing bacteria, *Bacteriol. Rev.* 29, 425-441 ( 1965).
- Valencia, F. T. and Songor L. A. *Estudio del mecanismo de generación de drenaje ácido en materiales de concentración del proyecto Río Blanco*, Tesis de Ingeniería, Facultad de Ciencia y Tecnología, UDA, Cuenca, EC, (2020).
- Villanueva, D., Metodología de caracterización geoquímica de residuos mineros aplicable en faena, Universidad de Chile , Santiago de Chile, 2019.
- Volke, T. and Velasco J. A. Tecnologías de remediación para suelos contaminados- in: *Semarnat/INE*, México DF, 21, (2002).

# **NOVELTY SEARCH APLICADO A SISTEMAS DE PREDICCIÓN DE FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN**

Jan Strappa<sup>ab</sup>, Paola Caymes Scutari<sup>ab</sup> y Germán Bianchini<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET),  
ARGENTINA.

<sup>b</sup>Laboratorio de Investigación en Cómputo Paralelo/Distribuido (LICPaD), Dpto. de  
Ingeniería en Sistemas de Información, UTN-FRM, Mendoza, ARGENTINA.

e-mail: [jstrappa@frm.utn.edu.ar](mailto:jstrappa@frm.utn.edu.ar)

## **RESUMEN**

*Los incendios forestales son fenómenos ambientales multicausales de gran prevalencia. En Argentina, entre enero y agosto de 2021, se reportaron 149.332 hectáreas afectadas. El impacto de estos incendios incluye pérdidas humanas, daños ambientales y económicos. Para mitigar estos daños, existen sistemas de simulación computacionales que predicen el comportamiento del fuego en base a un conjunto de parámetros de entrada, o escenario (velocidad, dirección del viento; temperatura; etc.). Sin embargo, los resultados de una simulación suelen tener un alto grado de error por la incertidumbre en los valores de algunas variables, por no ser conocidos, o debido a mediciones imprecisas o erróneas. Por este motivo se han desarrollado métodos que combinan resultados de un conjunto de simulaciones sobre distintos escenarios, para detectar tendencias y así reducir dicha incertidumbre. Dos propuestas recientes, ESSIM-EA y ESSIM-DE, utilizan algoritmos evolutivos paralelos (un algoritmo genético y evolución diferencial, respectivamente) para orientar el espacio de escenarios a considerar, logrando mejoras en la calidad predictiva. Estos enfoques están guiados por una función objetivo, originalmente pensada para converger a una única solución en problemas tradicionales. Dicha función objetivo no siempre es un indicador directo de la calidad de las soluciones. En trabajos previos se han encontrado limitaciones como convergencia prematura, que han requerido acciones de calibración y sintonización para incorporar soluciones más diversas al proceso de predicción. Para superar estas limitaciones, en este trabajo proponemos aplicar el paradigma Novelty Search (búsqueda basada en novedad), reemplazando la función objetivo por una medida de la novedad de las soluciones encontradas, para generar continuamente soluciones con comportamientos diferentes entre sí. Este enfoque logra evitar óptimos locales y permitiría encontrar soluciones útiles que serían difíciles de hallar por otros algoritmos. Al igual que los métodos existentes, esta propuesta también podría aplicarse a otros modelos de propagación (inundaciones, avalanchas o corrimientos de tierra).*

Palabras Clave: Predicción de Incendios Forestales, Metaheurísticas, Búsqueda Basada en Novedad, Reducción de Incertidumbre.

## **INTRODUCCIÓN**

Los incendios forestales son fuegos descontrolados de rápida propagación que afectan a terrenos con vegetación tales como bosques, llanuras, pastizales, pasturas, entre otros (SINAGIR 2018). Sus causas pueden ser naturales, es decir, por factores climáticos, por ejemplo, por sequías, baja humedad, olas de calor; o antrópicas, provocados, en muchos casos, por fogatas y colillas de cigarrillos mal apagadas, basurales a cielo abierto, abandono de tierras, preparación de áreas de pastoreo con fuego, entre otras causas. Los

efectos del cambio climático hacen que el riesgo de incendios aumente por las extremas sequías y las altas temperaturas. Entre los impactos negativos es posible mencionar la pérdida de vidas humanas, evacuaciones, daño a la flora y fauna, emisiones atmosféricas, erosión del suelo, y grandes impactos económicos, tanto por reparación de daños y costos de la lucha contra el fuego, como por perjuicios indirectos a distintas actividades productivas (por ejemplo, el degradamiento de paisajes afecta al turismo). En Argentina, en particular, la relevancia de los incendios forestales se mantiene todos los años, variando las regiones afectadas en cada época del año. Entre el 1 de enero y el 28 de octubre de 2021, los incendios reportados han afectado una superficie estimada de 273.045 hectáreas, y se estima que el 95% de los incendios forestales son causados por intervención humana (Argentina.gob.ar 2021).

La lucha contra este tipo de incendios involucra distintas fases, entre ellas la detección de los focos de incendios, la predicción de ocurrencia y la predicción del comportamiento. Los métodos a los que hace referencia este trabajo pueden ser empleados en las fases de prevención y predicción. Las herramientas para predecir el comportamiento de los incendios forestales son de gran interés para la toma de decisiones en el control de incendios, con el fin de mitigar sus consecuencias. Existen diversos simuladores desarrollados para predecir el comportamiento del fuego, por ejemplo, *BEHAVE* (Burgan and Rothermel 1984), *FARSITE* (Finney 1998), *fireLib* (Smith 2016), *BehavePlus* (Heinsch and Andrews 2010) y *FireStation* (Lopes, Cruz, and Viegas 2002). Estos simuladores utilizan modelos de propagación cuyo objetivo es predecir la evolución de la línea de fuego a lo largo de un período de tiempo, representada por mapas que indican el área del terreno alcanzada por el fuego en cada paso de predicción. Para esto, los simuladores requieren un conjunto de parámetros de entrada, llamados también *escenarios*, que describen características que afectan a la propagación, tales como el tipo de material combustible, su humedad, pendiente y relieve del terreno, temperatura, y la velocidad y dirección del viento. Desde el punto de vista computacional, este problema de predicción es desafiante debido a la complejidad de los modelos involucrados y a las fuentes de incertidumbre existentes en los datos de entrada. Este último aspecto es de gran importancia dado que las limitaciones para proveer parámetros de entrada correctos para el modelo conducen a errores en la predicción. Esta incertidumbre se debe a la dificultad o imposibilidad de obtener los valores de las variables, tanto por limitaciones de recursos (por ejemplo, cantidad de sensores), porque las mediciones son indirectas (por ejemplo, la medición de la humedad de la vegetación), o porque las variables tienen un comportamiento dinámico y no es viable su observación en tiempo real (por ejemplo, características del viento). Esto hace que la predicción basada en una solución única no sea confiable.

Para enfrentar esta incertidumbre, se han propuesto métodos que combinan resultados de múltiples simulaciones para mitigar los efectos negativos de la misma. Este tipo de métodos se denominan DDM-MOS (*Data-Driven methods with Multiple Overlapping Solutions*, Métodos Guiados por Datos con Múltiples Soluciones Solapadas), dos de los cuales han sido desarrollados recientemente: ESSIM-EA (Méndez Garabetti et al. 2015, 2017) y ESSIM-DE (Tardivo et al. 2017). Su funcionamiento involucra la combinación de una Etapa de Optimización, para obtener escenarios cuya simulación permita obtener buenas predicciones, con una Etapa de Análisis Estadístico, que construye una matriz de probabilidades a partir de la agregación de mapas obtenidos, para así poder predecir el comportamiento de la línea de fuego. En el caso de ESSIM-EA, el método de optimiza-



ción empleado es *un algoritmo genético*, mientras que en ESSIM-DE se utiliza un algoritmo de *evolución diferencial* (Talbi 2009). Debido a la carga de cómputo de este proceso, ambos sistemas utilizan cómputo paralelo; concretamente, se basan en un *modelo de islas* (Talbi 2009), utilizando una doble jerarquía de procesos que les permite abarcar mejor el espacio de búsqueda y acelerar la optimización. Es importante señalar que, además de emplearse para la prevención y predicción de incendios forestales, estos métodos pueden aplicarse a otros modelos de propagación, tales como inundaciones, avalanchas o corrimientos de terreno.

Experimentalmente, ESSIM-EA ha demostrado obtener predicciones de buena calidad, mientras que ESSIM-DE redujo significativamente los tiempos de respuesta, pero sin obtener mejoras en calidad. Por esta razón, posteriormente se ha trabajado en mejorar el rendimiento del método ESSIM-DE mediante estrategias denominadas de *sintonización* (Naono et al. 2010). Las estrategias de sintonización permiten calibrar algún aspecto crítico, cuello de botella o factor limitante de la aplicación para mejorar su desempeño, y estas pueden ser automáticas (cuando las técnicas están incorporadas en la aplicación de forma transparente) y dinámicas (los ajustes ocurren durante la ejecución) (Caymes Scutari et al. 2016). En el caso de ESSIM-DE, se desarrollaron e implementaron dos métricas de sintonización (Tardivo et al. 2018, 2019), ambas orientadas a mitigar los problemas de convergencia prematura y estancamiento de la población presentes en el caso de aplicación del algoritmo. Los resultados mostraron que mejora tanto la calidad como los tiempos de respuesta respecto al mismo método sin sintonización.

A pesar de las mejoras demostradas por los enfoques mencionados, estos aún tienen algunas limitaciones. En primer lugar, el diseño de la etapa de optimización de ESSIM-EA está basado en metaheurísticas pensadas para problemas de soluciones únicas, que utilizan una función de aptitud o *fitness* para evaluar la calidad de las soluciones. En este sistema, se emplean las soluciones de la última población generada para seleccionar el conjunto de soluciones que se utilizará en las etapas de predicción. Las metaheurísticas evolutivas tienden a converger a una población de genotipos similares (es decir que la combinación de valores de los diferentes escenarios o individuos es muy similar), por lo que la población evolucionada para cada paso de predicción puede consistir en un conjunto de escenarios similares entre sí, lo que limita el aporte de estas soluciones a la reducción de incertidumbre. Por otro lado, se dejan de lado soluciones que pueden estar genotípicamente alejadas en el espacio de búsqueda, pero que aun así pueden tener valores de aptitud aceptables que contribuyan a la predicción.

Por otro lado, en el caso de ESSIM-DE, en una primera versión se encontró que la calidad de los resultados no mejoraba respecto a ESSIM-EA, por lo que se modificó a una nueva versión en la que los resultados se obtienen mediante la agregación de una colección más amplia de simulaciones realizadas durante la búsqueda. Esta estrategia tiende a una mayor diversidad (porque incorpora parte de los resultados independientemente de su *fitness*), y produjo mejores resultados en calidad que la original. Aun así, los resultados indicaban problemas de comportamiento de ED: *convergencia prematura* y *estancamiento*. Esto llevó a la necesidad de diseñar mecanismos de sintonización, entre ellos un *operador de reinicio de poblaciones* (Tardivo et al. 2018), el cual compensa el estancamiento o la convergencia prematura del algoritmo, pero descarta información potencialmente útil de poblaciones producidas en pasos de predicción anteriores. Estos resultados son indicadores de una alta complejidad del problema, que puede deberse a distintos factores. Por ejemplo, la función de aptitud podría producir un espacio de búsqueda

queda con múltiples óptimos locales, llevando al algoritmo a estancarse en alguno y perder la posibilidad de alcanzar el óptimo global u óptimos locales mejores. Por este motivo, es factible suponer que el carácter más explotativo del algoritmo de optimización de ESSIM-DE (respecto al de ESSIM-EA) produce un detrimento en la calidad de los resultados.

### Nuevo enfoque basado en novedad

Las limitaciones observadas en los sistemas existentes llevan a considerar la selección de otros enfoques de búsqueda que puedan producir mejoras en la calidad de las predicciones. Los enfoques de búsqueda tradicional, incluyendo metaheurísticas como las utilizadas en ESSIM-EA y ESSIM-DE, recompensan el grado de avance hacia una solución, medido mediante una función objetivo, usualmente denominada función de puntaje o aptitud (*fitness*), dependiendo del tipo de algoritmo. Esta función, junto a los operadores de vecindario de un algoritmo concreto, produce lo que se conoce como *paisaje de fitness* (*fitness landscape*) (Malan and Engelbrecht 2013). En problemas altamente complejos, el paisaje de *fitness* suele presentar características que hacen que la función objetivo no sea eficiente para guiar la búsqueda, o que incluso impida que la búsqueda encuentre buenas soluciones. Un ejemplo de estas características es una función objetivo *engañosa* (respecto a un algoritmo determinado), lo cual consiste, en términos simples, en que la combinación (mediante los operadores del algoritmo) de soluciones de alta aptitud conduzca a soluciones de menor aptitud y viceversa (Ollion and Doncieux 2011; Malan and Engelbrecht 2013). La *búsqueda basada en novedad* o *Novelty Search* (NS) (Lehman and Stanley 2008, 2013) es un paradigma de búsqueda que ignora el objetivo como guía para la exploración y, en su lugar, recompensa a soluciones candidatas que presentan comportamientos novedosos, es decir, diferentes a los anteriormente descubiertos, con el fin de maximizar la exploración y evitar óptimos locales. Se ha aplicado con buenos resultados a múltiples problemas de diversas áreas, siendo especialmente beneficiosa en problemas engañosos (Gomes, Urbano, and Christensen 2013; Krčah 2012; Lehman and Stanley 2008, Ollion and Doncieux 2011).

Por sus características, la búsqueda basada en novedad es una alternativa prometedora frente a las limitaciones de las metaheurísticas aplicadas previamente al problema. Los algoritmos que siguen este paradigma implementan una función para evaluar el *puntaje de novedad* de las soluciones. Para esto se define una medida de distancia *dist* en el espacio de comportamientos de las soluciones, la cual es dependiente del problema; un ejemplo es la diferencia entre valores de la función de *fitness* de dos individuos. Una función de puntaje de novedad frecuentemente utilizada es la presentada originalmente por (Lehman and Stanley 2008):

$$\rho(x) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k dist(x, \mu_i), \quad (1)$$

donde  $\mu_i$  es el  $i$ -ésimo vecino más cercano del individuo  $x$  de acuerdo con la medida de distancia *dist*. En la literatura, el parámetro  $k$  suele seleccionarse experimentalmente, pero también puede utilizarse toda la población (Lehman and Stanley 2011; Gomes, Mariano, and Christensen 2015). En este contexto,  $x$  es un escenario, y la función *dist* se define en base al comportamiento de cada par de escenarios. En este caso, el compor-

tamiento podría ser simplemente la aptitud de cada escenario. Para realizar esta evaluación, no es suficiente seleccionar individuos cercanos considerando solo la población actual, sino que también es necesario considerar el conjunto de individuos que han sido novedosos en iteraciones pasadas. Con este fin, la búsqueda incorpora un *archivo de soluciones novedosas* que permite llevar registro de las soluciones más novedosas descubiertas hasta el momento, y lo utiliza para calcular el puntaje de novedad. Los valores de novedad obtenidos se utilizan en lugar del tradicional puntaje basado en aptitud, para guiar la búsqueda de una manera que maximice la exploración del espacio de búsqueda.

Este diseño permite que la búsqueda no se vea afectada por el *paisaje de la función de fitness (fitness landscape)*, previniendo de manera directa los problemas de convergencia prematura y estancamiento. En metaheurísticas convencionales, debido a la aleatoriedad involucrada en los algoritmos, es posible que algunas soluciones de alto *fitness* se pierdan en iteraciones intermedias, sin que quede registro de ellas en la población final. La búsqueda por novedad, en cambio, puede evitar el problema de pérdida de información gracias a que, cuando se aplica a problemas de optimización, se hace uso de una memoria de la solución o soluciones con mejor comportamiento. Esto se debe a que la búsqueda, al ser guiada por el puntaje de novedad, nunca converge, pero es posible llevar registro de las mejores soluciones (respecto a la función de aptitud o cualquier caracterización del comportamiento de las soluciones) encontradas a lo largo de la búsqueda.

Por otro lado, en la literatura existen múltiples enfoques híbridos que combinan *fitness* y novedad y se ha demostrado que son efectivos para resolver problemas prácticos (Gomes, Mariano, and Christensen 2015). Entre algunos de los enfoques utilizados se encuentran sumas ponderadas entre objetivos basados en *fitness* y en novedad (Cuccu and Gomez 2011), objetivos diferentes en una búsqueda multiobjetivo (Mouret and Doncieux 2012), búsquedas independientes con algún tipo de interacción a lo largo del tiempo (Krčah 2012), entre otros (Pugh et al. 2015; Cully et al. 2015; Mouret and Clune 2015; Lehman and Stanley 2008; Gomes, Urbano, and Christensen 2013).

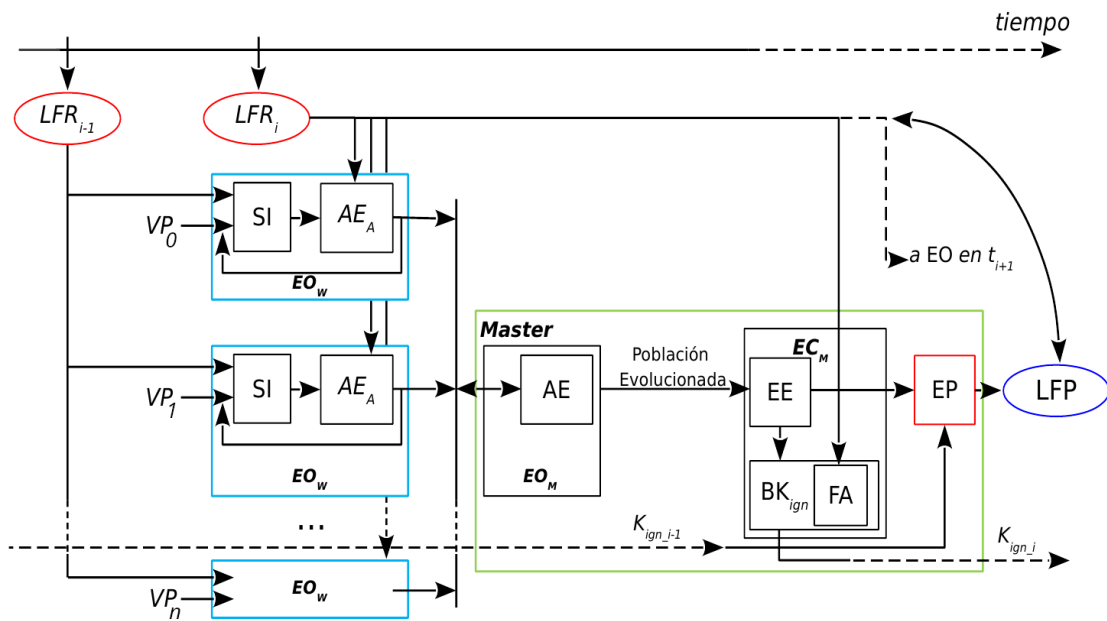
Otro aspecto importante de este tipo de enfoque consiste en que, al igual que las metaheurísticas de los sistemas de predicción actuales, los algoritmos de búsqueda basada en novedad también permiten diversas posibilidades de paralelización. Las metaheurísticas, usualmente, son factibles de ser paralelizadas mediante uno o más modelos de paralelización, con el fin de obtener mejores tiempos de ejecución, un uso de recursos más eficiente, o mejoras en calidad. En el caso particular de NS, la paralelización puede ser una forma de permitir a la búsqueda una mayor capacidad de exploración sin afectar de forma excesiva el tiempo de ejecución. Además, al ser implementable mediante múltiples metaheurísticas tradicionales, NS también puede ser sujeta a los mismos modelos de paralelización que estas. Sin embargo, al diferenciarse de métodos tradicionales por la inclusión de un archivo y por la posibilidad de hibridación con técnicas basadas en *fitness*, aparecen nuevas oportunidades y desafíos en el diseño de métodos paralelos. Un ejemplo de un enfoque de paralelización que utiliza NS puede encontrarse en (Hodjat, Shahrzad, and Miikkulainen 2016). En base a estos análisis, la hipótesis del presente trabajo se resume en que la aplicación de una metaheurística basada en búsqueda por novedad al problema de predicción de incendios forestales puede obtener resultados comparables o mejores en calidad respecto a métodos existentes.

## MÉTODOS

En esta sección, se resume el funcionamiento de los sistemas anteriores en los que se basará el nuevo método propuesto, comenzando por un antecesor común, para pasar luego a los sistemas más recientes, es decir, ESSIM-EA y ESSIM-DE. Posteriormente, se motiva y se describe el marco preliminar para la nueva metaheurística.

### Entorno general del sistema ESS

Para poder comprender el esquema del método propuesto en este trabajo, es necesario conocer el sistema llamado Sistema Estadístico Evolutivo, o ESS (*Evolutionary Statistical System-ESS*). Tanto ESSIM-EA como ESSIM-DE están basados en este sistema. Un esquema general del funcionamiento de ESS puede observarse en la Fig. 1 (reproducida de Tardivo et al., 2019). En este sistema se emplea un patrón de diseño paralelo Master/Worker para reducir los tiempos de cómputo. El proceso considera diferentes instantes de tiempo discretos para la predicción. Estos instantes se denominan *pasos de predicción* y, en cada uno de ellos, tienen lugar cuatro etapas principales: Etapa de optimización (dividida en Master y Workers, respectivamente:  $EO_M$  y  $EO_W$ ), Etapa Estadística (EE), Etapa de Calibración ( $EC_M$ ) y Etapa de Predicción (EP).



**Figura 1.** Sistema Estadístico Evolutivo. SI: simulador de incendios,  $EO_M$ : Etapa de Optimización en Master,  $EO_W$ : Etapa de Optimización en Worker, AE: Algoritmos Evolutivos,  $AE_A$ : Algoritmo Evolutivo (evaluación de aptitud),  $EC_M$ : Etapa de Calibración en Master, EP: Etapa de Predicción, EE: Etapa Estadística,  $BK_{ign}$ : búsqueda del valor clave de ignición, FA: función de aptitud,  $t_n$ : instante de tiempo  $n$ ,  $LFP_n$ : línea de fuego predicha para  $t_n$ ,  $LFR_n$ : línea de fuego real en  $t_n$ ,  $VP_{\{0..n\}}$ : vectores de parámetros (escenarios),  $K_{ign,n}$ : valor clave de ignición para  $t_n$ .

El proceso comienza con la Etapa de Optimización, durante la cual se realiza una búsqueda de escenarios en base a la función de aptitud. El proceso Master inicializa y gestiona la población de escenarios, representados por un conjunto de vectores de parámetros.

tros  $VP_{\{0..n\}}$ , y luego distribuye estos escenarios a los procesos Workers. Los Workers usan el escenario, junto a la línea de fuego real del instante  $t_{i-1}$  ( $LFR_{i-1}$ ), como entrada para un simulador de comportamiento del fuego **SI**, obteniendo un mapa simulado por cada escenario. El **SI** es el implementado por la biblioteca *fireLib* (Smith 2016). La función de *fitness* que se utiliza para evaluar la aptitud es el *Índice de Jaccard* (Real and Vargas 1996), al considerar el mapa del terreno como una matriz de celdas cuadradas (dado que esa es la representación utilizada por el simulador). La ecuación es

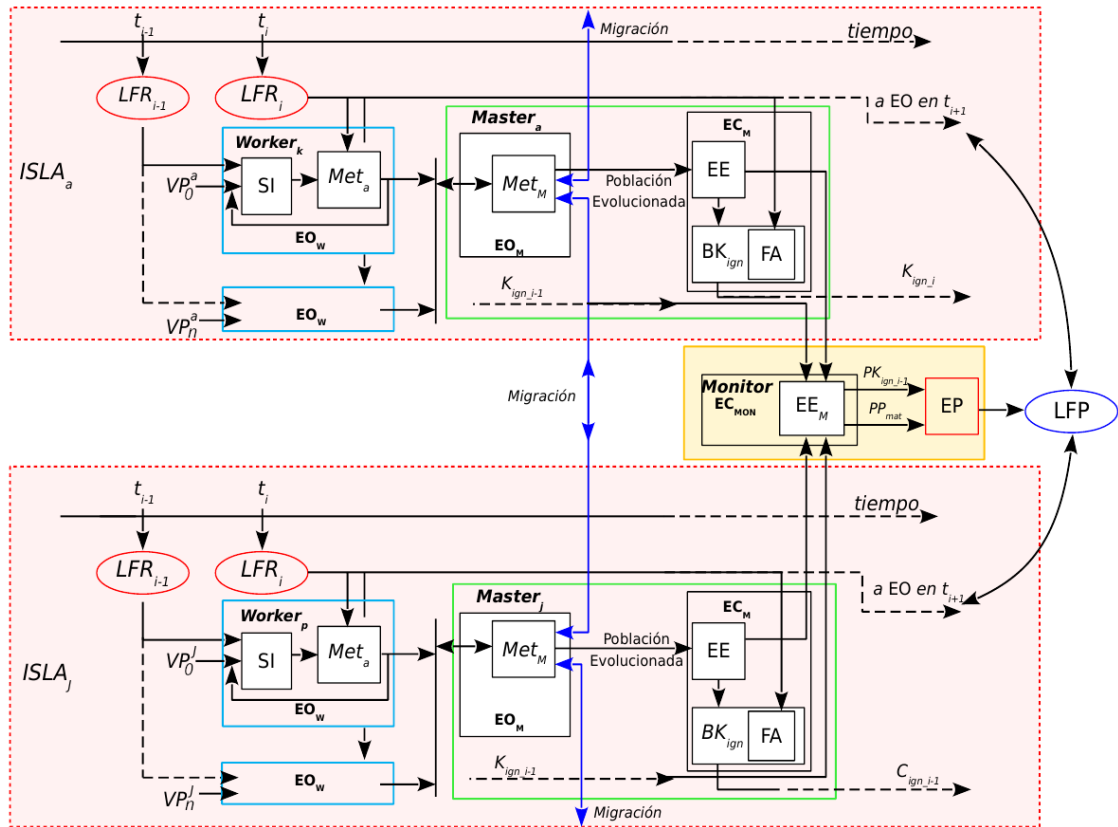
$$fitness(A, B) = \frac{A \cap B}{A \cup B}, \quad (2)$$

donde  $A$  representa el conjunto de celdas en el mapa real sin el subconjunto de celdas quemadas antes de comenzar las simulaciones, y  $B$  representa el conjunto de celdas en el mapa de simulación sin el subconjunto de celdas quemadas antes de comenzar la simulación. Las celdas quemadas anteriormente no se tienen en cuenta para evitar resultados sesgados. Esta fórmula mide la similitud entre la predicción y la realidad, y es igual a 1 cuando hay una predicción perfecta, mientras que un valor de 0 indica la peor predicción posible. Luego de obtener la simulación, se compara el mapa simulado con el estado real del incendio en el mismo instante de tiempo,  $LFR_i$ , de acuerdo a la función de aptitud.

Posteriormente a la  $EO_M$ , el Master agrega los mapas resultantes en una matriz en la que cada celda representa la probabilidad de ignición de esa región. Esto corresponde a la Etapa Estadística o **EE**. Dicha matriz se utilizará con dos propósitos: por un lado, se proporciona como entrada para la Etapa de Predicción; por otro lado, se utiliza en la Etapa de Calibración ( $EC_M$ ). La  $EC_M$  es necesaria para obtener una predicción a partir del mapa agregado. En esta etapa, se calcula un mapa de probabilidad para obtener un valor umbral llamado *Valor Clave de Ignición*, o  $K_{ign}$ , que representa mejor el patrón de comportamiento del fuego para el paso de simulación dado. Este valor se obtiene mediante la búsqueda de un valor umbral que, cuando se aplica a la matriz de probabilidad, produce la mejor predicción en términos de la función de aptitud para el paso de tiempo actual. Esta búsqueda está representada por el bloque  $BK_{ign}$  en la Fig. 1. El nuevo valor  $K_{ign_{n+1}}$  se utiliza dentro de la **EP** del siguiente paso de predicción; por lo tanto, la predicción no puede comenzar en el primer instante de tiempo. Una vez que se obtuvo un primer valor de umbral, es posible realizar la **EP** en cada iteración siguiente, para lo cual se utiliza la matriz obtenida al aplicar el umbral  $K_{ign_n}$  para realizar la predicción de la línea de fuego para el paso de tiempo actual.

### **Funcionamiento de ESSIM-EA y ESSIM-DE**

Tanto ESSIM-EA como ESSIM-DE pueden esquematizarse de la misma manera, siguiendo la representación de la Fig. 2, reproducida de Méndez Garabetti et al., 2015. En términos generales, el proceso predictivo se divide en las mismas etapas que en el caso de ESS. Sin embargo, dado que ambos sistemas utilizan un esquema jerárquico de procesos de dos niveles, estas etapas se subdividen de manera diferente para ser realizadas en cada proceso de la jerarquía: Monitor, Masters y Workers. Esencialmente, el sistema utiliza un número de islas, cada una de las cuales tiene un Master y un número de Workers; el Monitor actúa como proceso Master para los Masters de las islas.



**Figura 2.** Esquema de ESSIM-EA y ESSIM-DE. SI: simulador de incendios, EO<sub>M</sub>: Etapa de Optimización en Master, EO<sub>W</sub>: Etapa de Optimización en Worker, Met<sub>M</sub>: metaheurística (Algoritmos Evolutivos o Evolución Diferencial) en Master, Met<sub>a</sub>: metaheurística (evaluación de aptitud), EC<sub>M</sub>: Etapa de Calibración en Master, EC<sub>MON</sub>: Etapa de Calibración en Monitor, EP: Etapa de Predicción, EE: Etapa Estadística, t<sub>n</sub>: instante de tiempo n, K<sub>ign,i</sub>: Valor Clave de Ignición en t<sub>i</sub>, BK<sub>ign</sub>: búsqueda de K<sub>ign</sub>, FA: función de aptitud, LFP<sub>t</sub>: línea de fuego predicha para t, LFR<sub>t</sub>: línea de fuego real del instante t, VP<sub>{0...n}</sub><sup>j</sup>: vectores de parámetros (escenarios) de la isla j, PK<sub>ign,i-1</sub>: K<sub>ign,i-1</sub> precalculado para t<sub>i</sub>, PP<sub>mat</sub>: matriz de probabilidades precalculada.

Al comenzar el proceso predictivo, el Monitor envía a cada isla la información inicial para llevar a cabo las diferentes etapas. El proceso Master de cada isla realiza la Etapa de Optimización, gestionando el proceso evolutivo, la migración, y la finalización (retorno de resultados al Monitor). En cada isla, el Master envía individuos a los procesos Workers, los cuales se encargan de su evaluación. Cada Worker calcula la aptitud de los individuos (escenarios), utilizando el simulador *fireLib* antes mencionado. Tras las evaluaciones, el Master realiza la Etapa Estadística, obteniendo la matriz de probabilidades para la EC y la EP. La primera es llevada a cabo por el Master, mientras que, para llevar adelante la EP, el Monitor recibe todas las matrices de probabilidad generadas por los Masters, junto con su valor de K<sub>ign</sub> y el *fitness* asociado, calculado por la Ec. 2. Entonces, el Monitor selecciona al mejor candidato, produciendo la predicción del paso actual.

## Esquema basado en Novelty Search: ESS-NS

El marco preliminar para el nuevo método, denominado ESS-NS (*Evolutionary Statistical System based on Novelty Search*), modifica los sistemas anteriores de dos maneras. En primer lugar, sustituye la metaheurística en la **EO** por otro algoritmo evolutivo, pero este implementa una estrategia basada en novedad. En segundo lugar, el modelo jerárquico de dos niveles se simplifica de nuevo a un modelo Master/Worker de un nivel (sin islas), en el que el proceso Master sólo delega la evaluación de los individuos a los Workers, ya que ésta es la parte más exigente del proceso de predicción. Por ello, el esquema para el nuevo sistema basado en NS es análogo al del sistema ESS original de la Fig. 1, con la reinterpretación de que el bloque del algoritmo evolutivo *AE*, en este caso, corresponde a la estrategia basada en NS. En esta primera versión, el cómputo de novedad (Ec. 1) está incluido dentro de este proceso (en el Master), debido a que requiere acceso a la información de otros individuos (los  $k$  vecinos que se consideren) en la población. Por lo tanto, el bloque de evaluación de aptitud  $AE_A$  solo realiza el cómputo de *fitness*, de forma similar a ESS, mientras que los cambios esenciales están en el proceso Master.

La simplificación del esquema para ESS-NS está motivada por la necesidad de disponer de un algoritmo de referencia para futuras comparaciones y poder analizar el impacto del algoritmo de NS por sí mismo en la calidad de los resultados. Además, un diseño más complejo requeriría decisiones adicionales sobre el comportamiento del algoritmo, y estas decisiones pueden afectar directamente tanto a la calidad como a la eficiencia del método.

## ALGORITMO Y DISCUSIÓN

La metaheurística seleccionada para la Etapa de Optimización es un algoritmo genético (AG), adaptado al paradigma NS, tanto por simplicidad de implementación como para fines comparativos con los sistemas existentes, ambos basados en variantes de algoritmos evolutivos. En este contexto, cada individuo es un escenario (por tanto, la población es un conjunto de escenarios). Se utiliza una codificación directa, es decir que tanto el genotipo como el fenotipo de un individuo es el conjunto de valores de los parámetros de entrada del simulador, mientras que la aptitud de un individuo se obtiene aplicando la Ec. 2. El pseudocódigo de la solución propuesta se encuentra en el Algoritmo 1. El mismo se basa parcialmente en el algoritmo propuesto en Doncieux et al. 2020, diferenciándose en varios aspectos. La diferencia principal es que nuestra versión agrega una colección de soluciones, *bestSet*. Esta colección se actualiza en cada iteración del AG, de manera que al concluir el bucle principal del algoritmo, el conjunto resultante contiene las soluciones de mejor *fitness* encontradas durante toda la búsqueda. Además, este algoritmo utiliza dos condiciones de parada (línea 6): por número de generaciones y por un umbral de *fitness* (ambas presentes en ESSIM-EA y ESSIM-DE), y también especifica los parámetros convencionales del AG, tales como tasa de mutación y cruzamiento. Otra diferencia es que el archivo de soluciones novedosas (*archive*) se administra con reemplazo solo en base a novedad, es decir, sin aleatoriedad. Estas características corresponden a una implementación “clásica” del paradigma NS, es decir, una optimización guiada exclusivamente por el criterio de novedad, y un conjunto de resultados basados en los mejores valores obtenidos mediante la función de aptitud. Estos criterios nos permiten establecer una base contra la cual será posible establecer comparaciones de variantes futuras del algoritmo. En cuanto a este aspecto, es impor-

tante señalar que, en sí mismo, NS utiliza una estrategia que no sólo mantiene la diversidad, sino que la refuerza activamente y, por tanto, resolvería el problema que originalmente hizo necesario recurrir a mecanismos como el modelo de islas.

---

**Algoritmo 1** Algoritmo genético basado en novedad con múltiples soluciones.

---

**Entrada:** tamaño de población  $N$ , cantidad de descendientes  $m$ , tasa de mutación  $mR$ , tasa de cruzamiento  $cR$ , cantidad de vecinos para el cómputo de novedad  $k$ , número máximo de generaciones  $maxGen$ , umbral de aptitud  $fThreshold$

**Salida:** el conjunto  $bestSet$  de individuos con mejor aptitud hallados durante la búsqueda

```

1:  $population \leftarrow initializePopulation(N)$ 
2:  $archive \leftarrow \emptyset$ 
3:  $bestSet \leftarrow \emptyset$ 
4:  $generations \leftarrow 0$ 
5:  $maxFitness \leftarrow 0$ 
6: while  $generations < maxGen$  and  $maxFitness < fThreshold$  do
7:    $offspring \leftarrow generateOffspring(population, m, mR, cR)$ 
8:   for each individual  $ind \in (population \cup offspring)$  do
9:      $ind.fitness \leftarrow evaluateFitness(ind)$ 
10:  end for
11:   $noveltySet \leftarrow (population \cup offspring \cup archive)$ 
12:  for each individual  $ind \in (population \cup offspring)$  do
13:     $ind.novelty \leftarrow evaluateNovelty(ind, noveltySet, k)$ 
14:  end for
15:   $archive \leftarrow updateArchive(archive, offspring)$ 
16:   $population \leftarrow replaceByNovelty(population, offspring, N)$ 
17:   $bestSet \leftarrow updateBest(bestSet, offspring)$ 
18:   $maxFitness \leftarrow getMaxFitness(bestSet)$ 
19:   $generations \leftarrow generations + 1$ 
20: end while
21: return  $bestSet$ 

```

---

Algoritmo 1. Pseudocódigo de la nueva metaheurística basada en novedad.

### Descripción del algoritmo

En primer lugar, la función  $dist$  elegida para el cómputo de novedad de la Ec. 1 consistirá en evaluar de forma directa la diferencia de  $fitness$  (utilizando la función de  $fitness$  de la Ec. 2):

$$dist(x, \mu_i) = fitness(x) - fitness(\mu_i). \quad (3)$$

Los parámetros de entrada del algoritmo incluyen: los parámetros típicos del GA, las dos condiciones de parada (número máximo de generaciones y umbral de aptitud), y un parámetro de NS: la cantidad de vecinos a considerar para el cómputo de novedad. Las estrategias de selección y reemplazo de población del GA han sido omitidas para mayor claridad. La salida,  $bestSet$ , consiste en una colección de soluciones obtenidas a lo largo de la búsqueda. Cada iteración del bucle principal (líneas 6 a 20) corresponde a una generación del AG. Al comienzo de cada generación, el algoritmo realiza los pasos de selección y reproducción, abstraídos en  $generateOffspring$ ; es decir, genera  $m$  descendientes en base a la población actual. El cómputo de  $fitness$  se realiza en las líneas 8



a 10 para todos los individuos. Estos valores son necesarios tanto para registrar en *bestSet* las mejores soluciones, como para el cómputo del puntaje de novedad de cada individuo de la Ec. 1. Por lo tanto, se necesita un segundo bucle para el cómputo de novedad (líneas 12 a 14). Internamente, *evaluateNovelty* compara al individuo *ind* con cada uno de los individuos del conjunto de referencia *noveltySet* mediante la medida de distancia *dist*, y luego toma a los *k* vecinos más cercanos, es decir, aquellos individuos  $ind' \in noveltySet$  para los que se obtienen los menores valores de  $dist(ind, ind')$ , y los utiliza para evaluar la función de novedad de acuerdo a la Ec. 1. La medida de distancia utilizada es la diferencia entre los valores de *fitness* de acuerdo a la Ec. 3. Luego de este bucle, las dos siguientes líneas logran que la búsqueda sea guiada por el puntaje de novedad. En la línea 15 se actualiza el archivo de soluciones novedosas con los descendientes que tengan valores de novedad más altos. El reemplazo de la población se realiza en la línea 16, también con el criterio de novedad. Luego, la línea 17 actualiza el conjunto *bestSet* para incorporar las soluciones en *offspring* que hayan obtenido mejores valores de *fitness*. Las líneas 18 y 19 actualizan el máximo valor de *fitness* encontrado y el número de generación evolutiva, respectivamente, para verificar las condiciones de parada en la siguiente iteración.

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La propuesta de este trabajo es un nuevo enfoque metaheurístico paralelo para la reducción de la incertidumbre en el problema de la predicción de la propagación de incendios forestales. Se espera que esta nueva estrategia permita obtener mejoras en la calidad de las predicciones. Como próximos pasos, se está trabajando en la implementación y experimentación de la primera versión de esta estrategia. Esta versión utiliza la paralelización sólo a nivel de las evaluaciones de *fitness*. También se centra en recordar las soluciones de mayor aptitud encontradas durante la búsqueda, una estrategia que se espera que obtenga mejores resultados si la función de aptitud es representativa de la calidad de las soluciones, incluso si las soluciones de buena calidad están dispersas por todo el espacio de búsqueda. En el caso de que las soluciones de alta aptitud no sean suficientes, también sería factible explorar posibles variantes del algoritmo que construyeran un conjunto de soluciones no sólo en función de los valores de aptitud, sino también por algún criterio como la adición de un porcentaje de soluciones novedosas o aleatorias. Otras líneas de trabajo futuro son la incorporación de métodos paralelos y/o distribuidos, como un modelo de islas. Este esquema requiere la definición de mecanismos de migración, los cuales podrían incorporar distintas formas novedosas de hibridación con estrategias basadas en la aptitud. Una mejora en eficiencia posible consiste en un cómputo de novedad distribuido, para lo cual se requeriría un esquema que utilice memoria compartida, pero debido a su complejidad y a que solo se orienta a reducir tiempos de cómputo, esto se plantea con una menor prioridad. También existe la posibilidad de utilizar un archivo y/o conjunto de soluciones de tamaño dinámico, un umbral de novedad para incluir soluciones en el archivo como en (Lehman and Stanley 2008), o incluso cambiar la metaheurística subyacente y adaptar sus mecanismos al problema de aplicación.

## REFERENCIAS

- Argentina.gob.ar. 2021. “Reporte diario del Servicio Nacional de Manejo del Fuego correspondiente a noviembre de 2021” *Argentina.gob.ar*. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/noviembre-2021>.
- Burgan, Robert E., and Richard C. Rothermel. 1984. “BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System—FUEL Subsystem.” *General Technical Report INT-167*. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 P. 167. <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-167>.
- Caymes Scutari, Paola, Germán Bianchini, Anna Sikora, and Tomàs Margalef. 2016. “Environment for Automatic Development and Tuning of Parallel Applications.” In *2016 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*, 743–50. Innsbruck, Austria: IEEE. <https://doi.org/10.1109/HPCSim.2016.7568409>.
- Cuccu, Giuseppe, and Faustino Gomez. 2011. “When Novelty Is Not Enough.” In *Applications of Evolutionary Computation*, edited by Cecilia Di Chio, Stefano Cagnoni, Carlos Cotta, Marc Ebner, Anikó Ekárt, Anna I. Esparcia-Alcázar, Juan J. Merelo, et al., 6624:234–43. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Cully, Antoine, Jeff Clune, Danesh Tarapore, and Jean-Baptiste Mouret. 2015. “Robots That Can Adapt Like Animals.” *Nature* 521 (7553): 503–7. <https://doi.org/10.1038/nature14422>.
- Doncieux, Stephane, Giuseppe Paolo, Alban Laflaquière, and Alexandre Coninx. 2020. “Novelty Search Makes Evolvability Inevitable.” *arXiv:2005.06224 [Cs]*, May. <http://arxiv.org/abs/2005.06224>.
- Finney, Mark A. 1998. “FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation.” *Res. Pap. RMRS-RP-4, Revised 2004*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 P. 4. <https://doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>.
- Gomes, Jorge, Pedro Mariano, and Anders Lyhne Christensen. 2015. “Devising Effective Novelty Search Algorithms: A Comprehensive Empirical Study.” In *Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 943–50. Madrid Spain: ACM. <https://doi.org/10.1145/2739480.2754736>.
- Gomes, Jorge, Paulo Urbano, and Anders Lyhne Christensen. 2013. “Evolution of Swarm Robotics Systems with Novelty Search.” *Swarm Intelligence* 7 (2-3): 115–44.
- Heinsch, Faith Ann, and Patricia L. Andrews. 2010. “BehavePlus Fire Modeling System, Version 5.0: Design and Features.” *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-249*. Fort Collins, CO: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 111 P. 249.
- Hodjat, Babak, Hormoz Shahrzad, and Risto Miikkulainen. 2016. “Distributed Age-Layered Novelty Search.” In *Proceedings of the Artificial Life Conference 2016*, 131–38. Cancun, Mexico: MIT Press. <https://doi.org/10.7551/978-0-262-33936-0-ch027>.
- Krčah, Peter. 2012. “Solving Deceptive Tasks in Robot Body-Brain Co-Evolution by Searching for Behavioral Novelty.” In *Advances in Robotics and Virtual Reality*, edited by Janusz Kacprzyk, Lakhmi C. Jain, Tauseef Gulrez, and Aboul Ella Hassanien, 26:167–86. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23363-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23363-0_7).
- Lehman, Joel, and Kenneth O Stanley. 2008. “Exploiting Open-Endedness to Solve Problems Through the Search for Novelty.” *Artificial Life*, January, 8.
- Lehman, Joel, and Kenneth O. Stanley. 2011. “Evolving a Diversity of Virtual Creatures Through Novelty Search and Local Competition.” In *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation - GECCO '11*, 211. Dublin, Ireland: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2001576.2001606>.
- Lehman, Joel, and Kenneth O. Stanley. 2013. “Evolvability Is Inevitable: Increasing Evolvability Without the Pressure to Adapt.” *PLoS ONE* 8 (4): 2–10.
- Lopes, A.M.G., M.G. Cruz, and D.X. Viegas. 2002. “FireStation — an Integrated Software System for the Numerical Simulation of Fire Spread on Complex Topography.” *Environmental Modelling & Software* 17 (3): 269–85.

- Malan, Katherine M., and Andries P. Engelbrecht. 2013. "A Survey of Techniques for Characterising Fitness Landscapes and Some Possible Ways Forward." *Information Sciences* 241 (August): 148–63. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.04.015>.
- Méndez Garabetti, Miguel, Germán Bianchini, Paola Caymes Scutari, María Laura Tardivo, and Verónica Gil Costa. 2017. "ESSIM-EA Applied to Wildfire Prediction Using Heterogeneous Configuration for Evolutionary Parameters." *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de La Computación*, 10.
- Méndez Garabetti, Miguel, Germán Bianchini, María Laura Tardivo, and Paola Caymes Scutari. 2015. "Comparative Analysis of Performance and Quality of Prediction Between ESS and ESS-IM." *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 314 (June): 45–60.
- Mouret, J.-B., and S. Doncieux. 2012. "Encouraging Behavioral Diversity in Evolutionary Robotics: An Empirical Study." *Evolutionary Computation* 20 (1): 91–133.
- Mouret, Jean-Baptiste, and Jeff Clune. 2015. "Illuminating Search Spaces by Mapping Elites." *arXiv:1504.04909 [Cs, Q-Bio]*, April. <http://arxiv.org/abs/1504.04909>.
- Naono, Ken, Keita Teranishi, John Cavazos, and Reiji Suda, eds. 2010. *Software Automatic Tuning*. New York, NY: Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6935-4>.
- Ollion, Charles, and Stéphane Doncieux. 2011. "Why and How to Measure Exploration in Behavioral Space." In *Proceedings of the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation - GECCO '11*, 267. Dublin, Ireland: ACM Press.
- Pugh, Justin K., L. B. Soros, Paul A. Szerlip, and Kenneth O. Stanley. 2015. "Confronting the Challenge of Quality Diversity." In *Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 967–74. Madrid Spain: ACM.
- Real, Raimundo, and Juan M. Vargas. 1996. "The Probabilistic Basis of Jaccard's Index of Similarity." *Systematic Biology* 45 (3): 380–85. <https://doi.org/10.1093/SYSBIO/45.3.380>.
- SINAGIR. 2018. "¿Qué es un incendio forestal?" *Argentina.gob.ar*. <https://www.argentina.gob.ar/sinagir/incendio-forestal>.
- Smith, Jessica E. 2016. "vFireLib: A Forest Fire Simulation Library Implemented on the GPU." Thesis.
- Talbi, El Ghazali. 2009. *Metaheuristics: From Design to Implementation*. *Metaheuristics: From Design to Implementation*. <https://doi.org/10.1002/9780470496916>.
- Tardivo, María Laura, Paola Caymes Scutari, Germán Bianchini, and Miguel Méndez Garabetti. 2017. "Hierarchical Parallel Model for Improving Performance on Differential Evolution: Hierarchical Parallel Model for Improving Performance on Differential Evolution." *Concurrency and Computation: Practice and Experience* 29 (10): e4087.
- Tardivo, María Laura, Paola Caymes Scutari, Germán Bianchini, and Miguel Méndez Garabetti. 2019. "Sintonización Dinámica del Método Paralelo de Predicción de Incendios Forestales ESSIM-DE." *XXV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 10.
- Tardivo, María Laura, Paola Caymes Scutari, Miguel Méndez Garabetti, and Germán Bianchini. 2018. "Optimization for an Uncertainty Reduction Method Applied to Forest Fires Spread Prediction." In *Computer Science – CACIC 2017*, edited by Armando Eduardo De Giusti, 790:13–23. Cham: Springer International Publishing.

# VARIACIONES DEL FLUJO DE SUBTERRÁNEO PASANTE EN EL SUBÁLVEO DEL RÍO POMÁN (CATAMARCA) Y SU RELACIÓN CON EL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

Esteban Tálamo<sup>a</sup>, Nora Varela<sup>a</sup>, Gustavo Morales<sup>a</sup> y Federico Díaz Ramos<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Geología, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, ARGENTINA

e-mail: [esteban.talamo@gmail.com](mailto:esteban.talamo@gmail.com)

## RESUMEN

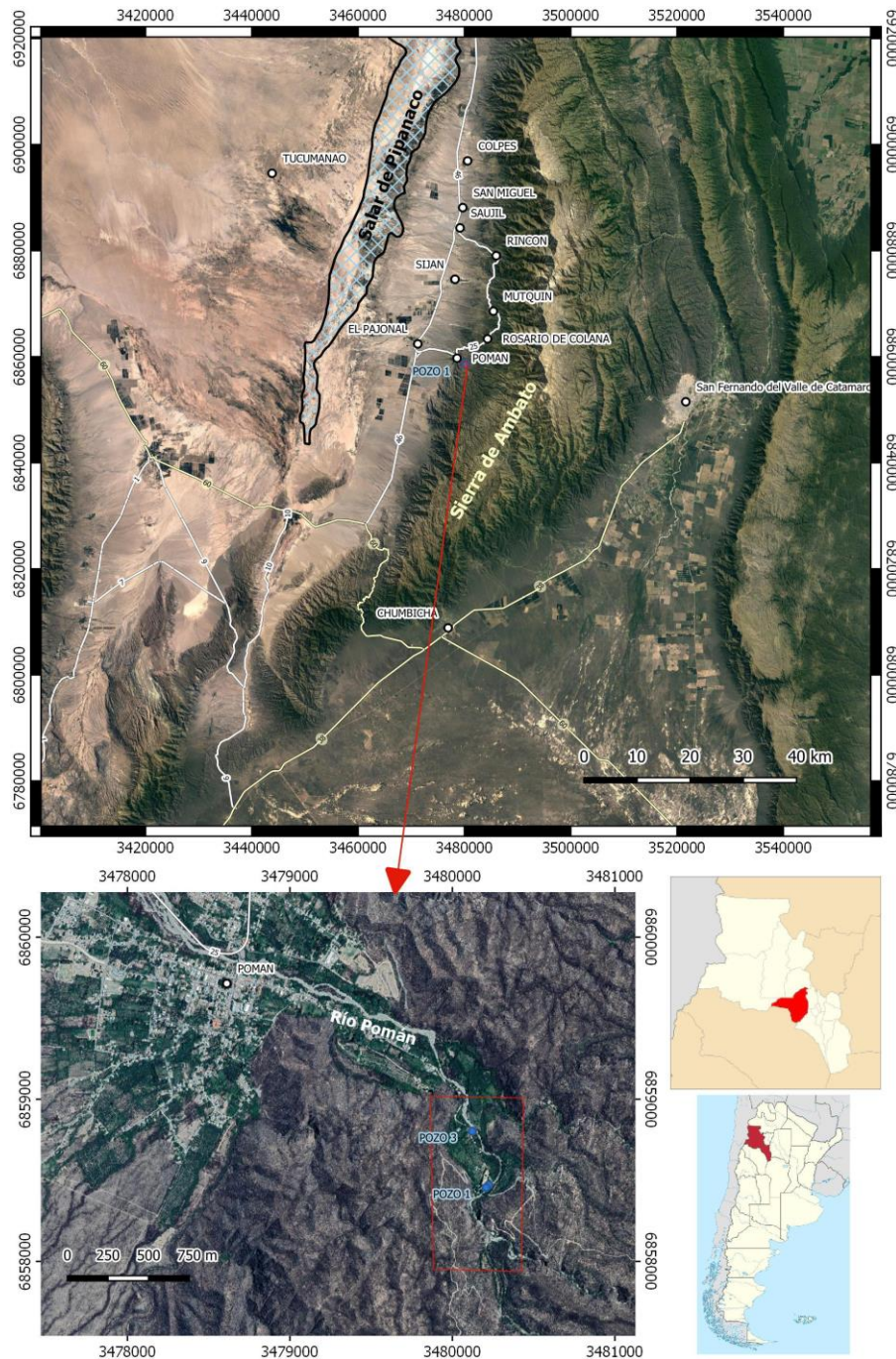
*La zona de estudio se encuentra ubicada en el faldeo occidental de la sierra de Ambato, entre las coordenadas 28° 23' 52.54" latitud Sur y 66° 12' 9.75" longitud Oeste y 28° 24' 46.78" latitud Sur y 66° 12' 9.06" longitud Oeste, en el Departamento Pomán, dentro de la cuenca hidrológica del Salar de Pipanaco. Se enmarca en el proyecto de investigación denominado "Variaciones de niveles piezométricos en el subálveo del río Pomán, una metodología para entender el aporte a la recarga del sistema acuífero de Pipanaco". Uno de los objetivos principales del mismo, es determinar el flujo natural pasante por el subálveo del Río Pomán aplicando la ley de Darcy, en las proximidades del Camping Municipal. En el presente trabajo se muestran los resultados de los cálculos del caudal subterráneo, logrados sobre la base de las mediciones de niveles piezométricos en diferentes campañas, con sus correspondientes consecuencias sobre el gradiente hidráulico y la variación del área drenante en la sección estudiada. En forma simultánea a la medición de los niveles piezométricos, se realizaron aforos del caudal superficial del río Pomán, de manera que se aprecia la relación de magnitudes de los flujos subterráneos y superficiales en diferentes épocas del año. Se concluye que el flujo del subálveo posee mínimas variaciones comparadas con las observadas en el curso fluvial, conformando en momentos de máximo estiaje, la única fuente de agua que entraría en recarga del Sistema Acuífero Pipanaco. Por el contrario, en momentos más próximos al período estival, el caudal superficial supera al subterráneo.*

Palabras Clave: Flujo subterráneo, Fío Pomán, Gradiente hidráulico, Caudal.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolla en el marco del Proyecto de Investigación de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Catamarca denominado: "Variaciones de niveles piezométricos en el subálveo del río Pomán, una metodología para entender el aporte a la recarga del sistema acuífero de Pipanaco", en el cual se busca determinar los procesos de recarga al sistema acuífero regional del Salar de Pipanaco. Uno de los objetivos principales del proyecto, es determinar el flujo natural pasante por el subálveo del Río Pomán aplicando la ley de Darcy, en las proximidades del Camping Municipal (Tálamo, et al., 2019 (b)). En el presente aporte se muestran las variaciones del flujo subterráneo en el tiempo, en un período que va desde el 03/04/19 al 17/10/20 (medidas manuales) y se los compara con el escurrimiento superficial. También se incluyen medidas de niveles registrados en divers en los Pozos 2 y 3 durante un período que va desde el 01/03/20 al 17/10/20.

De esta manera se pretende diferenciar dos mecanismos de recarga involucrados con el agua colectada en la cuenca imbrífera del río Pomán y que escurre por la quebrada hacia el oeste de manera superficial y subterráneamente. Uno de los mecanismos de recarga propuestos sería por transferencia directa desde el subálveo del río hacia las facies acuíferas regionales desarrolladas en el piedemonte, al abandonar el sistema serrano. El otro mecanismo, consiste en la infiltración progresiva del agua superficial en su caudal base, en las mismas facies sedimentarias mencionadas anteriormente. La ubicación de la zona de estudio puede observarse en Figura 1.



**Figura 1.** Ubicación general y detalle de la zona estudiada.

## MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para poder alcanzar los objetivos propuestos, se ha trabajado en la adquisición de datos de niveles piezométricos en perforaciones existentes en el entorno de la quebrada del Río Pomán, próximo al Camping Municipal. Para tales efectos se procedió a la instalación de instrumental (divers) capaz de medir y almacenar la columna de agua y sus variaciones en el tiempo, datos que posteriormente, se transforman en niveles estáticos, referidos a la boca del pozo, mediante la medición manual del nivel estático en el momento de la instalación de los equipos (Tálamo et al., 2020 (a) y (b)). Los registros almacenados son cotejados con mediciones manuales efectuadas durante las visitas de campo realizadas en el marco del proyecto de investigación.

De manera simultánea con las mediciones de niveles del agua subterránea, se realizaron aforos del flujo superficial del río Pomán, para lo cual se midieron las velocidades del agua con molinete hidrométrico y la superficie de la sección analizada (Tálamo et al., 2020 (c)). Los datos arrojados se procesaron con planillas de cálculo, utilizando el método de la Semi-sección.

El flujo pasante de agua subterránea por el subálveo del río Pomán en la sección del badén cercano al camping municipal, fue determinado y desarrollado en (Tálamo et al., 2019) donde se aplicaron los conceptos que engloba la ley de Darcy para medios porosos:  $Q = k i S$ , siendo:

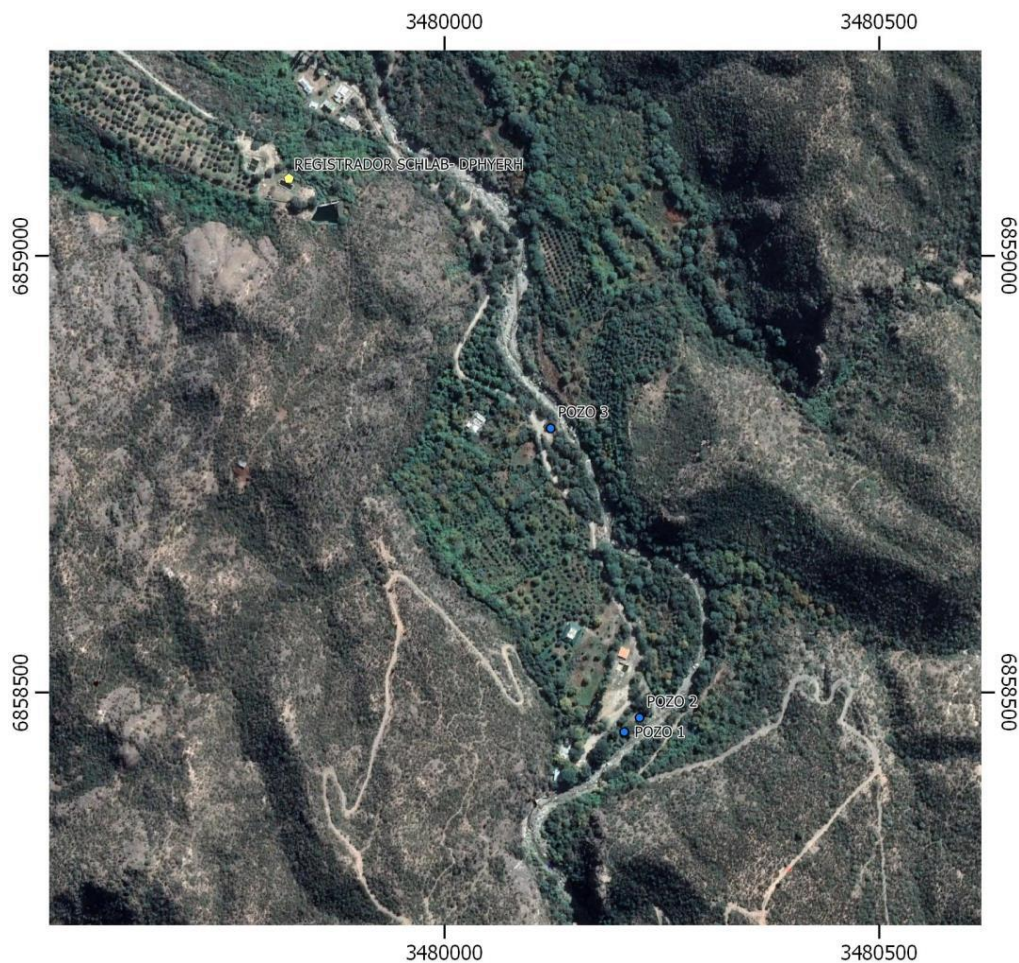
Q: el caudal subterráneo expresado en  $m^3/d$

k: la permeabilidad del medio estudiado expresado en m/d – Obtenido por ensayos de bombeo.

S: la superficie o área de la sección saturada en la sección analizada ( $m^2$ ), establecida por métodos geofísicos (Tálamo et al., 2019 (a)).

i: el gradiente hidráulico del acuífero (adimensional). Calculado por mediciones altimétricas de los niveles de pozos existentes en la quebrada.

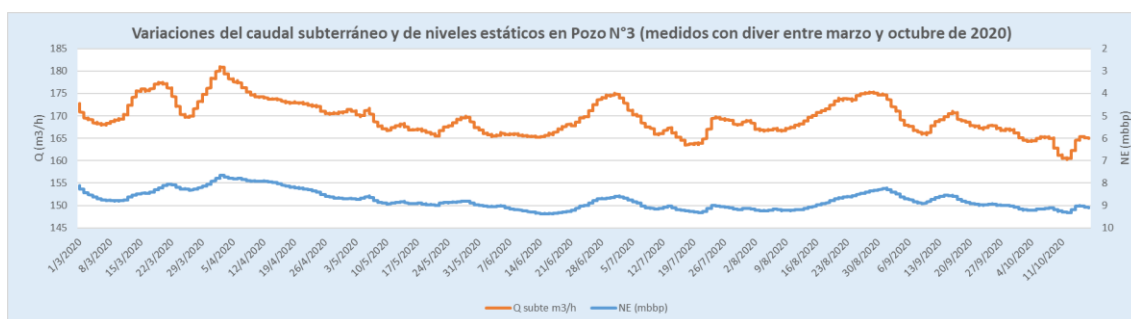
Al obtener medidas simultáneas de niveles mediante divers con adquisición de un dato cada hora en Pozo 2 y Pozo 3 (Ver Figura 2), pudo establecerse la variación del gradiente hidráulico y de la superficie o sección drenante transversal subterránea. Con el dato obtenido de la permeabilidad del medio (16 m/d), y aplicando la Ley de Darcy se puede calcular la variación del caudal subterráneo pasante.



**Figura 2.** Detalle de ubicación de las perforaciones existentes en la quebrada del río Pomán.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el período comprendido entre 1/3/2020 y 17/10/2020 se lograron medidas simultáneas de niveles mediante divers en Pozo 2 y Pozo 3. Procesando los datos y aplicando la Ley de Darcy se obtuvo también la variación del caudal subterráneo pasante en ese período (Ver Figura 3).



**Figura 3.** Variaciones temporales de Nivel estático en Pozo 3 y caudales de flujo subterráneo calculados.

De manera similar a la expresada anteriormente, se trabajó con los datos manuales de mediciones de niveles estáticos en los pozos existentes en la quebrada de Pomán, durante campañas en las que también se adquirieron datos de caudal superficial en la zona del Badén. Cabe destacar que los caudales superficiales informados representan una magnitud tal, que terminan infiltrándose en su recorrido por el cono aluvial, recargando el sistema acuífero regional. En ningún caso se cuenta con los caudales de crecidas, que permiten la llegada del agua hasta la misma depresión de Pipanaco.

De esta manera se comparan los valores obtenidos de caudal subterráneo con los del escurrimiento superficial (Tabla 1).

Tabla I. Cálculo del caudal subterráneo con mediciones manuales de niveles en Pozos 2 y 3, y comparación con aforos superficiales

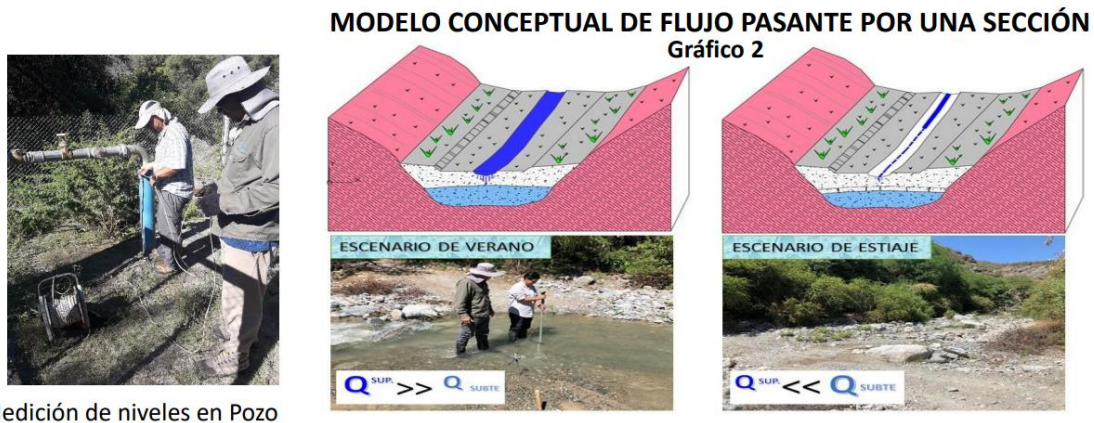
Fecha	dH P2-P3 (m)	Gradiente hidráulico	$\Delta$ NE P2 (m)	Sección drenante (m <sup>2</sup> )	k (m/d)	Q subte. (m <sup>3</sup> /d)	Q subte. (m <sup>3</sup> /h)	Q sup. (m <sup>3</sup> /h)	Q. Tot. (m <sup>3</sup> /h)	% agua subte
3/4/2019	22.871	0.06424	0.00	4040	16	<b>4152.8</b>	<b>173.0</b>	s/d	---	---
4/4/2019	22.951	0.06447	0.04	4033.25	16	<b>4160.3</b>	<b>173.3</b>	399.6	572.9	30.3
5/4/2019	23.086	0.06485	0.04	4033.25	16	<b>4184.8</b>	<b>174.4</b>	1728.0	1902.4	9.2
6/4/2019	23.186	0.06513	0.04	4033.25	16	<b>4202.9</b>	<b>175.1</b>	1220.4	1395.5	12.6
17/4/2019	24.216	0.06802	0.09	4053.5	16	<b>4411.7</b>	<b>175.1</b>	s/d	---	---
18/12/2019	23.896	0.06712	0.00	4040	16	<b>4338.9</b>	<b>175.1</b>	7.2	188.0	96.2
27/2/2020	23.371	0.06565	0.94	4181	16	<b>4391.6</b>	<b>175.1</b>	367.2	550.2	33.4
17/10/2020	23.371	0.06565	0.18	4013	16	<b>4215.2</b>	<b>175.1</b>	7.2	182.8	95.9

Como se desprende de la Figura 3, el período analizado muestra una tendencia de descenso de los niveles freáticos del sistema, asociado al período de estiaje del curso fluvial. Concordantemente con esta situación, se aprecia también una disminución del caudal subterráneo pasante, aunque la magnitud de esta variación no es muy importante.

En la misma figura se observan también, variaciones en el nivel estático del Pozo 2, que responderían a eventos de precipitaciones en la cuenca alta y que explicarían los ascensos registrados dentro de la tendencia general descendente.

Al analizar los datos de la Tabla 1, surge también que las diferencias existentes en el caudal subterráneo no son significativas, de manera contraria al caudal superficial aforado, que muestra variaciones muy importantes, ya que pasa de períodos de gran escurrimiento superficial, y otros donde prácticamente al mismo es inexistente (Ver Figura 4). De esta manera puede establecerse que la relación del agua subterránea versus la superficial que atraviesan la sección analizada (en el badén próximo al Camping Municipal), muestra una prevalencia que varía entre el 9 y el 96 %.





**Figura 4.** Izq. Medición manual de niveles estáticos Der. Modelo conceptual con indicación de la magnitud del escurrimiento superficial en diferentes períodos o escenarios.

## CONCLUSIONES

La Metodología empleada se considera muy valiosa y confiable para la determinación de órdenes de magnitud de los escurrimientos superficiales y subterráneos en la zona estudiada.

El comportamiento de los niveles estáticos medidos en los pozos, reflejan los eventos relacionados a incrementos de caudal y por ende a precipitaciones que se generan aguas arriba del badén que cruza el río Pomán.

La magnitud del caudal subterráneo pasante en la sección analizada presenta variaciones muy pequeñas, que hasta permitirían considerar el flujo como constante en el tiempo investigado.

El caudal del río Pomán está sujeto a las descargas pluviométricas anuales en la alta cuenca, por lo que varía de extremos de gran escurrimiento luego de las lluvias estivales, para disminuir progresivamente hasta valores prácticamente nulos de escurrimiento superficial en su período de estiaje (primavera a principios del verano).

El caudal base del río Pomán, se infiltra progresivamente en su lecho recargando de este modo al sistema acuífero regional de Pípanaco. Por otra parte, la transferencia subterránea desde el subálveo del río, hacia el sistema acuífero regional, se considerada constante en el tiempo, aunque su magnitud sea significativamente menor, en aquellos períodos de tiempo donde el río sostiene un caudal en superficie.

En los momentos de máximo estiaje en la zona del Badén, el caudal superficial se vuelve prácticamente nulo, siendo la única fuente de recarga el aporte subterráneo que atraviesa la sección en el área de estudio.

## REFERENCIAS

- Tálamo, E., Vilches, Sánchez, M. Varela N., Caicedo D., Carrizo N., Martínez G. y Brusa S. 2019 (a). Aplicación de métodos geofísicos para la determinación del espesor de los depósitos aluviales en la quebrada del río Pomán. XIV Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. Consejo de Decanos de Ingeniería del NOA (CODINOA). Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA. Consejo de Decanos de Ingeniería del NOA (CODINOA). Revista N°5 – ISSN: 1853-6662.
- Tálamo, E., Brusa, Martínez, G., Vilches, F. y Morales, G. 2019 (b). Determinación del caudal pasante y parámetros hidráulicos en una sección del subválveo del río Pomán. Dpto Pomán. Prov. de Catamarca. Actas de Trabajos Completos del E-ICES 15: Decimoquinto Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra - 1a ed revisada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2020. ISBN 978-987-1323-64-7.
- Tálamo, E., Vilches, F., Díaz Ramos, F. y Morales, G. 2020. (a) Utilización de instrumental tecnológico para el monitoreo de las variaciones piezométricas en el acuífero aluvial de la quebrada del río Pomán – Catamarca - Argentina. Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA. Consejo de Decanos de Ingeniería del NOA (CODINOA). Revista N°6 – ISSN: 1853-6662.
- Tálamo, E., Vilches, F., Díaz Ramos, F. y Morales, G. 2020 (b). Relación entre las precipitaciones y las variaciones piezométricas en la quebrada del río Pomán – Catamarca – argentina. Actas de Trabajos Completos del E-ICES 15: Decimoquinto Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra - 1a ed revisada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2021. ISBN 978-987-1323-66-1.
- Tálamo, E., Vilches, F., Varela, N., Morales, G. y Díaz Ramos, F. 2020 (c). Medición de caudales superficiales en la quebrada del río Pomán, Catamarca, Argentina. RETyCA (Revista de Tecnología y Ciencias Aplicadas). ISSN: 2525-2097 - Vol. 5 –N°2 - (2020).

# CONSIDERACIONES SEDIMENTARIAS Y PALEOAMBIENTALES DEL ABANICO ALUVIAL DEL RÍO SAN IGNACIO, TUCUMÁN, ARGENTINA

Mario A. Toledo<sup>a</sup>, Ana Lía Ahumada<sup>a,b</sup> y Gloria P. Ibañez Palacios<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Geología de Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, ARGENTINA  
<sup>b</sup>CONICET

e-mail: [matoledo@lillo.org.ar](mailto:matoledo@lillo.org.ar)

## RESUMEN

*El abanico aluvial del río San Ignacio se encuentra ubicado en la transición entre el piedemonte y la llanura aluvial del departamento La Cocha, provincia de Tucumán. Esta geoforma, se produjo por la deposición de sedimentos transportados por las corrientes del río homónimo, cuyas nacientes se encuentran en la cuenca de Balcosna, provincia de Catamarca. Está compuesto por sedimentos de textura predominantemente arenosa, con porcentajes de grava media a gruesa y en menor frecuencia por fanglomerados de tamaño bloque. Por su predominante textura arenosa presenta pendiente longitudinal suave y extendida, cercana al 2%. Se deducen, según la disposición, composición y estructura de los sedimentos fluviales que componen las barrancas, continuos cambios en el curso del río, a través de complejas relaciones carga de sedimentos / caudal, determinándose cuatro episodios en la dinámica hídrica que conformó este cuerpo sedimentario. Los perfiles analizados, se encuentran en el ápice y porción media distal del abanico. Se infiere que el abanico aluvial del río San Ignacio se habría formado bajo condiciones áridas a semiáridas, en base al estudio de las capas sedimentarias inferiores, mientras que en las capas superiores se denota una transición hacia un mayor porcentaje de humedad.*

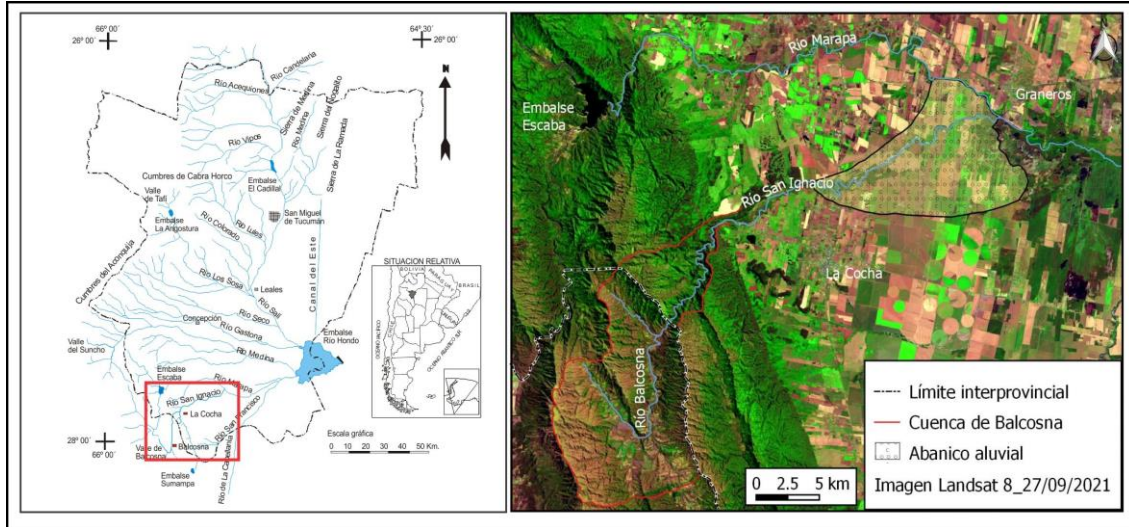
Palabras Clave: Abanico aluvial, río San Ignacio, Sedimentos fluviales

## INTRODUCCIÓN

El abanico aluvial del río San Ignacio se originó por la deposición de sedimentos procedentes de la cuenca de Balcosna como consecuencia del cambio de pendiente en la transición piedemonte–llanura aluvial. Este cuerpo sedimentario se encuentra ubicado al suroeste de la provincia de Tucumán, en el departamento La Cocha (Figura 1). Fue descrito desde el punto de vista hidrogeológico por Falcón (1987). Su ápice o área proximal se encuentra ubicado aproximadamente en la curva de nivel de los 450m s.n.m. a la salida de las lomadas terciarias; con una dirección aproximada NNE-SSO. Su máxima extensión está controlada por el río Marapa (Tineo et al, 1990).

Con la descripción de las secuencias que forman parte de este cuerpo sedimentario, en barrancas que facilitaron la observación y descripción de los sedimentos, se comprobó que mayoritariamente son de naturaleza psamítica con contenido de gravas de guijarros y guijones y en menor proporción bloques (en el 10% de los sedimentos estudiados).

Con el propósito de realizar el análisis de los materiales asociados a este abanico, desde el punto de vista paleoambiental, se describieron dos perfiles estratigráficos en las barrancas, ubicadas en la transición entre la zona de cabecera y la zona interna del cuenco del abanico, sobre la margen derecha e izquierda del río San Ignacio.



**Figura 1.** Ubicación del abanico aluvial en la provincia de Tucumán.

Estos trabajos fueron realizados tomando en consideración la hipótesis Harvey (1992), quien postula que los abanicos aluviales pueden preservar un registro detallado de los cambios ambientales ocurridos durante su formación, y que el factor clima es el factor más importante como inductor de cambios morfológicos y sedimentológicos en su desarrollo.

Las observaciones y determinaciones realizadas en ambos perfiles revelan sucesos ambientales ocurridos durante el Cuaternario Superior, resaltados por la disposición de las capas y la inferencia de los procesos intervinientes.

## MÉTODOS O DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la caracterización de las capas de loess, paleosuelos y sedimentos fluviales de los perfiles estudiados se siguieron los criterios sedimentológicos y edáficos tradicionales (textura a campo, estructura, color (Munsell Soil Color Charts, 1994), pH, contenido de carbonatos, barnices, tipos y formas de límites, espesores de las capas etc. Los perfiles estudiados fueron seleccionados previamente con la condición de ser representativos de materiales asociados al abanico aluvial. Las muestras obtenidas fueron recogidas en bolsas plásticas para facilitar su traslado y posterior tratamiento en laboratorio. El trabajo consistió en la determinación de las clases texturales y la separación de las fracciones granulométricas de las muestras fluviales provenientes de las estructuras de corte y relleno. La determinación de las clases texturales, se realizó dispersando la muestra previamente tamizada con una solución de hexametáfosfato de sodio (Calgón). Con el método del Hidrómetro por Bouyoucos se determinaron los porcentajes de arena, limo y arcilla para cada muestra. Luego se determinó la clase textural correspondiente haciendo uso del triángulo textural. Posteriormente se realizó la separación de las

fracciones granulométricas, pasando una determinada cantidad de muestra por tamiz 250 más fondo. El contenido de fondo limo+arcilla fue utilizado para determinar el tipo de arcillas presentes en la muestra. Lo que quedó retenido en el tamiz 250 fue dispersado con hexametáfosfato de sodio (Calgón). Se pasó la muestra por una serie de tamices (4, 10, 40, 200 y 230), se recogió, secó y pesó el sedimento retenido en cada tamiz, determinándose de esta manera los porcentajes de grava, arena gruesa, arena media, arena fina y arena muy fina. La determinación de pH, se realizó utilizando un pHímetro digital. Las suspensiones utilizadas fueron 1:2,5 (suelo-agua) en muestras tamizadas en tamiz malla 2mm.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos de la descripción de los perfiles descriptos fueron los siguientes:

**Perfil BI.** Compuesto por sedimentos psamíticos que forman parte de las estructuras de corte y relleno desarrolladas sobre la secuencia de loess y paleosuelos (Figura 2).

Capa 1. Fluvial (0,00 – 1,20m), Franco arenoso gravilloso, con láminas de arcilla y de grava fina de clastos de cuarzo, granito y esquistos. Laminación paralela, con gradación inversa. Friable. Color: seco= 7,5 YR 5/3, húmedo= 7,5 YR 4/3. pH 7,3. No calcáreo. Límite abrupto ondulado.

Capa 2, Fluvial (1,20 – 4,05m), Franco arenoso gravilloso. Laminación paralela. Capas de arena gruesa a media con capas intermedias de arena muy fina y gravilla de granito. Friable, Color: seco= 7,5 YR 5/3, húmedo=7,5 YR 4/3, pH: 7,4. No calcáreo. Límite claro ondulado.

Capa 3, Fluvial (4,05 – 5,33m), Franco arenoso gravilloso. Laminación paralela grosera, con capas de arena fina se encuentran interestratificadas con capas de grava fina. Friable. Color: seco=7,5 YR 5/4, húmedo=7,5 YR 4/3, pH: 7,4. No calcáreo (N). Límite abrupto ondulado.

Capa 4, Fluvial (5,33 – 5,48m), Franco arenoso gravilloso, estructura masiva. Friable, con clastos redondeados de granito < 1cm. Color: seco= 7,5 YR 5/3, húmedo= 7/5 YR 3/3, pH: 7,5. No calcáreo. Límite abrupto ondulado.

Capa 5, Fluvial (5,48 – 6,33m), Franco arenoso gravilloso, con clastos de cuarzo y granito de hasta 1cm de diámetro. contiene abundante muscovita. Laminación paralela grosera. Friable. Color: seco=7,5 YR 5/4, húmedo= 7,5 YR 3/4, pH 7,91. No calcáreo. Límite claro suave.

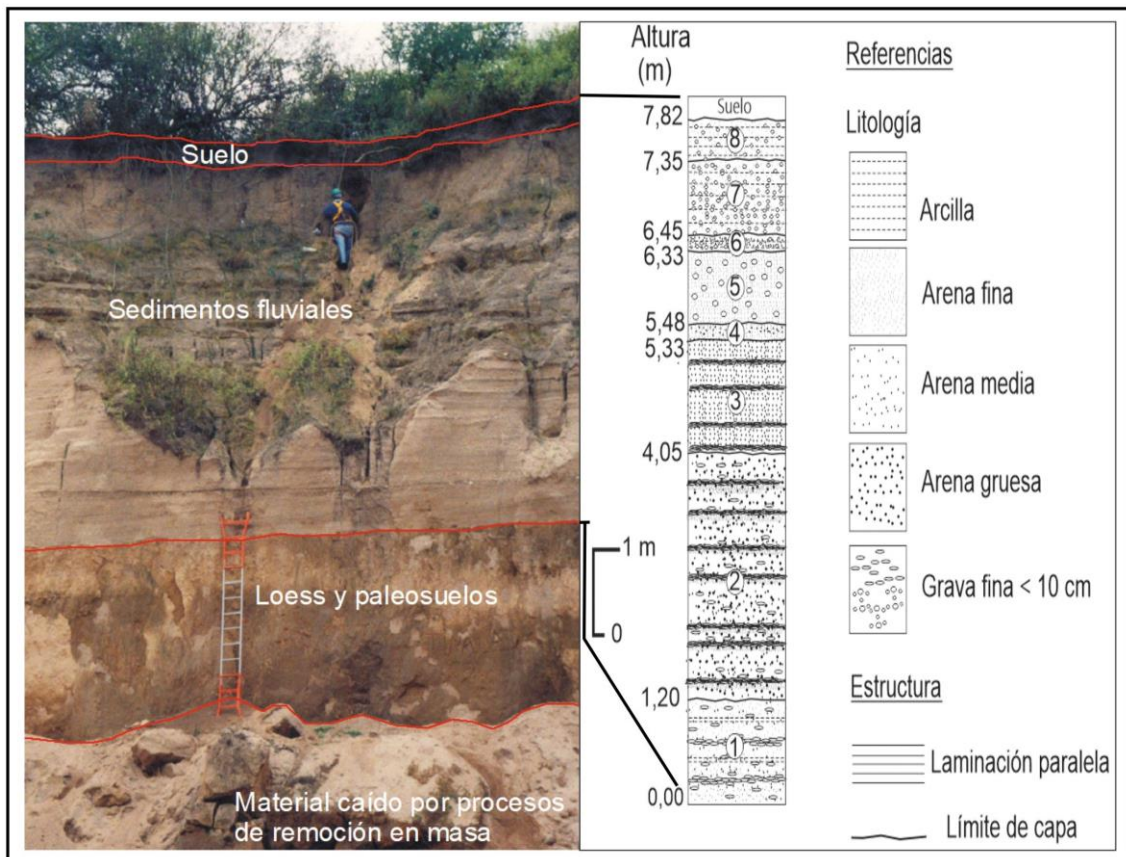
Capa 6, Fluvial (6,33 – 6,45m), Franco arcillo arenoso gravilloso. Masivo, con clastos mayores a 1cm, con agregados de gránulos muy finos. Friable. Color: seco= 7,5 YR 5/4, húmedo=7,5 YR 3/4. No plástico, no adhesivo, pH: 7,85. No calcáreo. Límite abrupto ondulado.

Capa 7, Fluvial (6,45 – 7,35m), Franco arcillo arenoso gravilloso, con rodados de grava fina y agregados de granos de cuarzo, granito y gneis. Color: seco= 7,5 YR 5/6,

húmedo= 7,5 YR 4/4. No plástico, no adhesivo, pH: 7,1. No calcáreo. Límite abrupto suave

Capa 8, Fluvial (7,35 – 7,82m), Franco arcillo arenoso gravilloso, con rodados de grava fina < 2cm. Masivo, Friable. Color: seco=7,5 YR 6/4, húmedo=7/5 YR 4/4. No plástico, no adhesivo. pH: 7,8. Moderadamente calcáreo. Límite gradual suave.

Capa 9, Suelo (7,82 – 8,22m).



**Figura 2.** Aspecto y descripción gráfica del Perfil BI, barranca derecha del río San Ignacio.

**Perfil BII.** Compuesto por sedimentos psefíticos y psamíticos, interestratificados con capas de loess y paleosuelos (Figura 3).

Capa 1, Loess (0,00 – 1,20m), Franco. Agregados prismáticos, duros en seco, de forma poliédrica de 2 a 3cm de diámetro con superficies desiguales y rugosas. Grado de estructura: débil. Color: seco=7,5 YR 7/4, húmedo= 7,5 YR 5/4. Plástico y ligeramente adhesivo, pH: 7,95. Moderadamente calcáreo, presenta pátinas de carbonato de calcio. Límite abrupto suave.

Capa 2, Fluvial (1,20 – 3,20m), Franco arenoso gravilloso. Laminación paralela. Alternan capas de arena fina y gruesa, clastos dispersos de granito, esquistos y cuarzo < 3cm. Friable. Color: seco= 7,5 YR 5/3, húmedo= 7,5 YR 4/3, pH: 6,9. No calcáreo (N). Límite gradual ondulado.

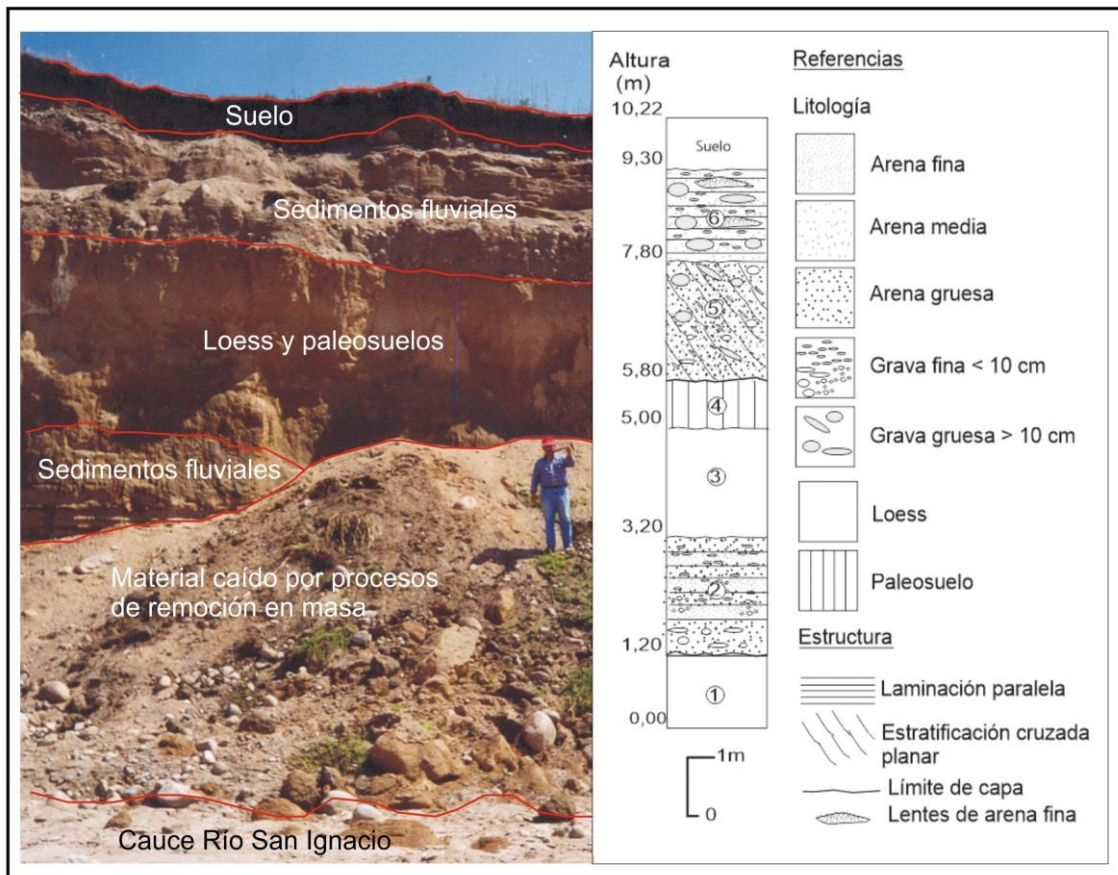
Capa 3, Loess (3,20 – 5,00m), Franco. Agregados poliédricos en forma de bloques subangulares, con caras redondeadas y planas de 2 a 5 cm de diámetro. Moderado. Color: seco= 7,5 YR 5/4, húmedo= 7,5 YR 4/4. Ligeramente plástico y ligeramente adhesivo, pH: 8,2. No calcáreo. Límite abrupto suave.

Capa 4, Paleosuelo (5,00 – 5,80m), Franco. Agregados de forma poliédrica en bloques angulares irregulares, con caras aplanadas y de forma concoidal. Presenta barnices finos, improntas de raíces y rastros de bioturbación. Débil. Color: seco=7,5 YR 4/4, húmedo=7,5 YR 4/3. No adhesivo, ligeramente adhesivo, pH: 8,00. No calcáreo. Moderado desarrollo pedogenético. Límite abrupto suave.

Capa 5, Fanglomerado (5,80 – 7,80m), Franco arenoso gravilloso, arena media a gruesa, estratificación cruzada planar, con cantos rodados de granitos, esquistos y cuarzo < 20 cm. Friable. Color: seco= 7,5 YR 5/4, húmedo= 7,5 YR 3/4, pH 7,5. No calcáreo (N). Límite claro suave.

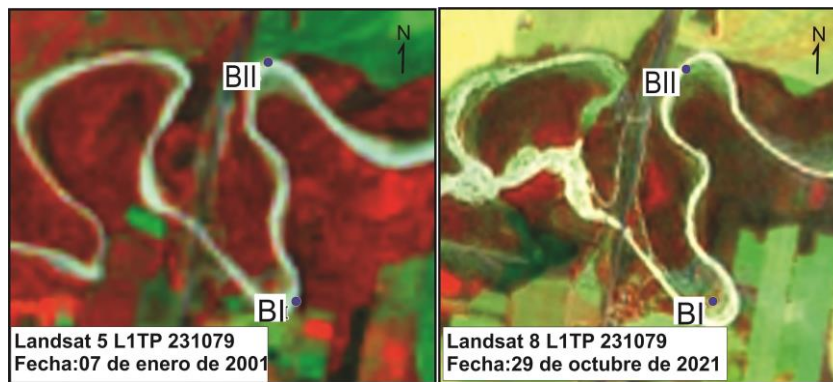
Capa 6, Fanglomerado (7,80 – 9,30m), Franco arenoso gravilloso, estratificación paralela, los clastos mayores presentan un tamaño de entre 30 a 50cm. Friable. Presenta lentes de arena muy fina, con laminación paralela. Color: seco= 7,5 YR 5/4, húmedo=7,5 YR 3/4, pH: 7,4. No calcáreo. Límite abrupto suave.

Capa 7, Suelo (9,30-10,22m)



**Figura 3.** Aspecto y descripción gráfica del Perfil BII, barranca izquierda del río San Ignacio.

Ambos perfiles fueron afectados por los elevados caudales que conduce el río San Ignacio durante la temporada de lluvias (noviembre a marzo), de régimen torrencial, produciendo erosión lateral de cauce y desplome de sedimentos en las barrancas, lo que fue incentivado por las actividades extractivas de áridos en el cauce, y depósitos de residuos sólidos urbanos en las curvas internas de los meandros, estas actividades orientan el escurrimiento superficial hacia las barrancas. Los Perfiles BI y BII fueron erosionados por la intensa dinámica fluvial, por lo que fueron reconstruidos siguiendo las barrancas expuestas en las curvas externas de los meandros, en base a las características de los materiales descritos originalmente. La figura 4 muestra las modificaciones en el diseño del cauce desde el año 2001 al año 2021, a causa de la dinámica erosiva y la posición que ocupaban los perfiles BI y BII.



**Figura 4.** Ubicación de los perfiles BI y BII descritos.

Las fotografías de las Figuras 5 y 6 muestran el aspecto actual de los sitios de muestreo donde se reconstruyen los perfiles BI y BII, de acuerdo a las características sedimentológicas descritas.



**Figura 5.** Estructuras de corte y relleno sobre loess y paleosuelos (27°43'14.40"S; 65°34'34.90"O).



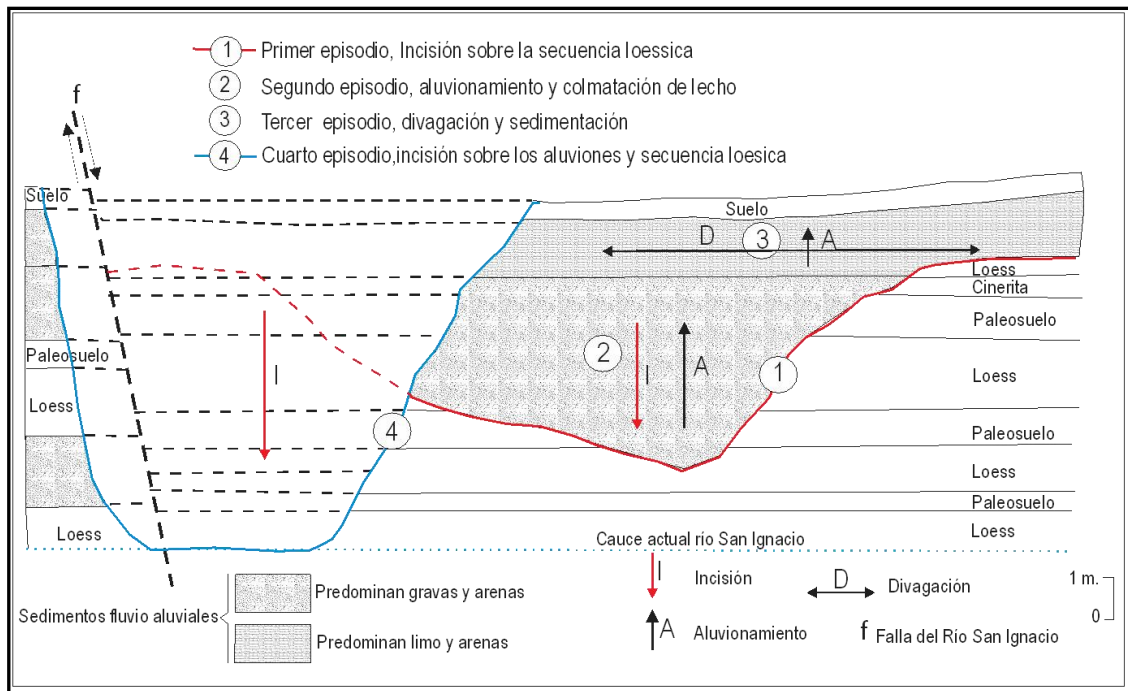


**Figura 6.** Estructuras de corte y relleno sobre loess y paleosuelos  
(27°43'10.00"S; 65°34'38.90"O).

Se deduce, según la disposición, composición y estructura de las capas que forman los perfiles estudiados, una compleja historia hidrogeomorfológica, con continuos cambios en el curso del río a través de complicadas relaciones carga de sedimentos / caudal. La causa de la disección sobre la secuencia de loess y paleosuelos puede estar relacionada con la disminución de los sedimentos suministrados desde la alta cuenca, aumento del caudal por lluvias extraordinarias, o cambios en el nivel de base.

En un primer episodio las corrientes fluviales habrían tenido la suficiente capacidad para producir una profunda incisión vertical en los materiales que componen la cobertura loésica, labrando un profundo cauce en los mismos. En un segundo episodio y por un cambio en la relación carga/caudal el río comenzó a depositar sus aluviones y a elevar su lecho, produciendo el relleno del cauce anterior, lo que representa una potencia sedimentaria media de 6m. En un tercer episodio las corrientes fluviales no se circunscribieron solamente a un cauce principal, sino que divagaron por la llanura de inundación abierta hasta que las corrientes disiparon completamente su energía, depositando los sedimentos acarreados. En esta zona según (Mukerji, 1976, en Colombo 1989) que correspondería al abanico medio-distal presenta una disminución apreciable en la descarga debido a factores como pérdida de agua por infiltración, junto a una evapotranspiración y una menor pluviosidad en la zona de llanura que en la zona de montaña. Las evidencias de estos procesos son probadas por los numerosos paleocauces observados en las fotografías aéreas y otras formas tales como planos fluviales e interfluviales. Esta dinámica construccional depositó una espesa capa de sedimentos sobre la cobertura loésica de aproximadamente 2,50m. En un cuarto episodio, el cual estaría relacionado a la ocupación humana en la zona, se produjo la incisión vertical de las corrientes sobre los aluviones aparentemente por cambios en el nivel de base de las corrientes. Esta incisión fue más profunda de aproximadamente 10,30m y afectó a las secuencias loess y paleosuelos, exhumó sedimentos fluviales aparentemente de edad pleistocena subyacentes a la secuencia de loess y paleosuelos del Holoceno, y descubrió

las estructuras de corte y relleno a través de la cual se realizó la interpretación de la figura 7.



**Figura 7.** Periodos de incisión y aluvionamiento del abanico aluvial del río San Ignacio, reconstruidos a partir de las observaciones realizadas en los perfiles BI y BII.

Los Perfiles BI y BII, representan superficialmente los materiales que componen el abanico aluvial. El Perfil BI se compone de una sucesión de capas arenosas, con porcentaje de grava fina < 10cm. Algunas de estas capas presentan estructuras de laminación paralela y otras no tienen estructuras, son masivas. Según Ramos (1989), estas capas representan una sedimentación fluvial episódica, común en zonas semiáridas, donde las lluvias esporádicas junto con una vegetación escasa dan lugar a una escorrentía muy rápida. Las corrientes bajo régimen semiárido son poco frecuentes y a menudo violentas, pudiendo estar confinadas en canales (stream floods) o como corrientes no confinadas que se extienden sobre amplias áreas (mantos de arroyada o sheet floods). Estas corrientes muy someras se desarrollan dentro de un régimen de flujo alto. Como resultado se forman cuerpos tabulares casi enteramente construidos por arenas con laminación paralela. En los casos de arenas masivas la rápida disminución de la energía de la corriente hace que no quede registro de las estructuras producidas en régimen de corriente bajo, tal como lo expresa Combina (1990) representa un sistema fluvial efímero de rápida saturación y veloz pérdida de agua por infiltración.

Las capas superiores de estas secuencias, a diferencia de las ubicadas más abajo se clasifican dentro de la clase franco arcillo arenosa gravilosa. La disminución en el tamaño de grano podría indicar una disminución en la capacidad de carga de las corrientes, sin embargo, la presencia de gravas distribuidas al azar dentro de la matriz de aproximadamente 2cm de diámetro, indica que las corrientes tenían cierta capacidad de transporte, y se asocia el mayor contenido de material fino a un área de proveniencia

asociada con la cobertura loéssica, o que este evento tuvo contemporaneidad con eventos de depositación loéssica. Estos cubren aparentemente grandes áreas en forma de mantos de arroyada (sheet floods) y se encuentran sobre los sedimentos fluviales. Estas capas se habrían originado, de acuerdo a lo expresado por Combina (1990), quien estudia los sistemas fluviales efímeros desarrollados dentro de mantos de loess, por flujos gravitacionales de fluidos turbulentos, que se han generado por una rápida saturación de los sedimentos pre-existentes (generalmente loess), fluyendo hacia lugares más planos.

El perfil BII muestra por otro lado una sucesión de capas de loess y sedimentos fluviales, que indica alternancia entre períodos de depositación loéssica (áridos y fríos) con períodos áridos a semiáridos.

Las capas fluviales presentan textura franco arenosa gravillosa, estructuras de laminación paralela y estratificación cruzada planar. Lo que representan sistemas efímeros ya descritos que se desarrollan bajo régimen árido a semiárido. La secuencia culmina con fanlomerados con estructura laminar, que fueron depositados bajo alto régimen de flujo.

En base a lo expuesto cabe destacar lo expresado por (Dorn, 1994, en Collantes, 2001), en el sentido de que existen discrepancias con relación a las condiciones paleoclimáticas que dieron origen a los abanicos aluviales. Algunos autores sostienen que la agradación se produce durante los períodos de mayor humedad, mientras otros sostienen que la agradación es mayor durante la transición a períodos de mayor aridez. También hay quienes sostienen que ambas condiciones climáticas pueden producir agradación. En relación a estas consideraciones y tomando en cuenta lo expresado por autores como Ramos (1989), Colombo (1989) y Combina (1990), el abanico aluvial del río San Ignacio se habría formado bajo condiciones áridas a semiáridas, mientras que en las capas superiores se infiere una transición hacia un mayor porcentaje de humedad, debido a la generación de flujos gravitacionales de fluido turbulento y/o granulares.

## **CONCLUSIONES**

-El análisis de los sedimentos del abanico aluvial indican la alternancia de períodos áridos y fríos de depositación loéssica con períodos áridos a semiáridos con desarrollo de suelos y de sistemas fluviales efímeros

-Un posterior período de denudación con participación importante de humedad en ambiente árido a semiárido, estacionalmente contrastado, produjo una intensa denudación de las áreas cumbreles, valles y piedemonte, lo que originó la formación del abanico aluvial. Este ciclo culmina luego con un período de extrema aridez que se prolonga hasta los 700-800 A.P., coincidente con el período Medieval Cálido Europeo.

-En la transición hacia las condiciones climáticas actuales se produjo el desarrollo de los sistemas fluviales, las terrazas de acumulación, ampliación de la llanura de inundación, el encajamiento de los meandros en el sustrato loéssico, producidos por el clima y la actividad tectónica de la zona.

-A partir del siglo XVI y debido a la deforestación y mal uso de los suelos con actividades tales como el sobrepastoreo, actividad agrícola y el cambio de base y modificación de los cursos fluviales, se han incentivado los procesos de erosión laminar, cárcavamiento y abarrancamiento

## REFERENCIAS

Colombo, F. Abanicos aluviales. Sedimentología Vol.1. Colección Nuevas tendencias. Coordinador Arche A., Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España: 143-218 (1989).

Collantes, M.M. Paleogeomorfología y geología del Cuaternario de la cuenca del Río Tafí, Departamento Tafí del Valle, Provincia de Tucumán, Argentina. Tesis Doctoral, inédita. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta (2001).

Combina, A.M. Sistemas efímeros desarrollados sobre mantos de loess en la zona de Cuatro Vientos, Río Cuarto, Córdoba, Argentina. En: Propiedades, Cronología y Significado Paleoclimático del Loess, M. Zárate (Ed.), Simposio Internacional sobre Loess, Resúmenes Expandidos: 59-63, Mar del Plata. Argentina (1990).

Falcón, C.M. Geología e hidrogeología de la Cuenca del Río Marapa, Dtos. Alberdi-La Cocha-Graneros, Pcia. de Tucumán. Seminario Inédito (1987).

Harvey, A.M. The occurrence and role of arid zone alluvial fans. In Arid Zone geomorphology, D.S.G. Thomas (Ed.), pp.136-158. London: Belhaven Press (1992).

Munsell soil colour charts: Baltimore, Maryland, Munsell Colour, 24p. (1994).

Ramos A. Sistemas aluviales Braided. Sedimentología Vol.1. Colección Nuevas tendencias. Coordinador Arche A., Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España: 67-106 (1989).

Tineo, A., Falcón, C. Y García, J. Características hidrogeológicas del Cono Aluvial del Río San Ignacio-Provincia de Tucumán (R.A.). 6º Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas. ABAS. Porto Alegre-RS-Brasil (1990).

# ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA ALMACENADA EN GLACIARES Y GLACIARES DE ROCA EN LA CUENCA ALTA DEL ARROYO YAUCHA, MENDOZA.

Bárbara Utesá<sup>a</sup> y Diego Winocur<sup>ab</sup>

<sup>a</sup>Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ciencias Geológicas, FCEN, ARGENTINA

<sup>b</sup>Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber – IDEAN (UBA-CONICET), ARGENTINA

e-mail: [barbara.utesa@gmail.com](mailto:barbara.utesa@gmail.com)

## RESUMEN

*La zona de estudio se ubica en la cuenca alta del arroyo Yaucha, al este de la laguna Diamante en la provincia de Mendoza. El objetivo del trabajo es calcular de manera preliminar y estimativa el volumen de agua contenido en forma de hielo en las geoformas glaciarias y criogénicas que aportan a la cuenca del río Tunuyán. Se realizó un reconocimiento, clasificación y mapeo a detalle de glaciares de hielo y glaciares de roca y luego se calculó el volumen ocupado por cada geoforma, partiendo del área ocupada y aplicando fórmulas empíricas para obtener su espesor estimado. Una vez obtenido el volumen total de la geoforma, se estableció el porcentaje de hielo presente en cada caso. Para los glaciares descubiertos se tomó un porcentaje de hielo del 100% y 85% para aquellos glaciares de hielo cubiertos. Por otra parte, los glaciares de roca fueron clasificados según su grado de actividad, donde los activos se consideraron con un contenido de hielo del 50% del volumen total, mientras que se consideró un 25% para inactivos y 5% para los fósiles. El volumen total de hielo estimado para la zona de estudio es de 273 hm<sup>3</sup>, que equivale a 246 hm<sup>3</sup> de agua retenido como reservorio en estas geoformas. Para su comparación, esto es equivalente al 160% del volumen de agua existente en el embalse El Carrizal a principios de 2021. Es importante destacar que sólo el 19% del agua almacenada se encuentra en los glaciares de hielo, mientras que el 81% está almacenado en los glaciares de roca. Esto permite identificar la importancia de la criósfera como reserva hídrica estratégica en un contexto de cambio climático y déficit hídrica, ya que conforman el principal reservorio de agua dulce de alta montaña y el amortiguador natural frente a la escasez de precipitaciones.*

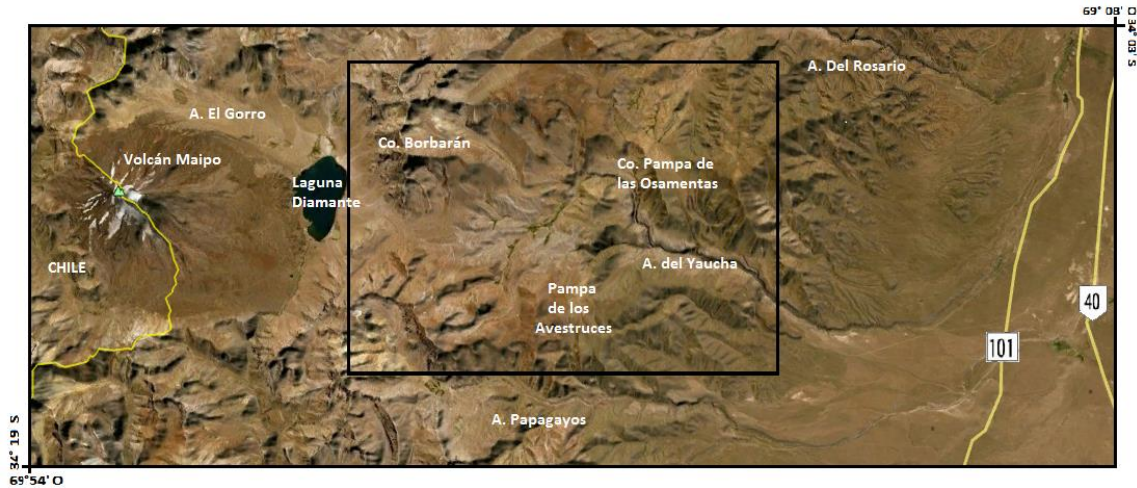
Palabras Clave: Andes, Glaciares de Roca, Recurso Hídrico, Arroyo Yaucha, Mendoza

## INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se encuentra dentro de la Reserva Natural Laguna del Diamante, Departamento de San Carlos, provincia de Mendoza, a 220 km al sur de su ciudad capital. La zona de estudio propiamente se ubica entre los 34° 16' y 34° 05' latitud sur y 69° 40' y 69° 22' longitud oeste y se desarrolla hacia el este del Complejo Diamante – Volcán Maipo, continuando a lo largo de ambas márgenes de las nacientes del arroyo del Yaucha, hasta la seccional Alvarado hacia el piedemonte (Fig. 1).

El paisaje que se observa en la zona de estudio se trata de un paisaje compuesto y policíclico, dada las evidencias de cambios en el nivel de base de los cursos fluviales presentes. La región posee un relieve montañoso y correspondiente a un ambiente periglacial. Toda el área está dominada principalmente por procesos de remoción en

masa, seguidos por procesos criogénicos, de meteorización, glaciarios, volcánicos, fluviales y lacustres subordinadamente. Asimismo se pueden observar pequeñas geoformas producto de procesos eólicos.



**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio.

Particularmente dentro de la zona de estudio, el relieve aumenta su altura respecto del nivel del mar, de este a oeste. En el sector este, las cumbres no superan los 3900 m s.n.m. Además, las pendientes son menos empinadas y abruptas que el sector oeste, el cual se caracteriza por paredes que llegan a ser casi verticales, superando fácilmente los 4000 m s.n.m., alcanzando un máximo que supera levemente los 5000 m s.n.m. en el cerro Borbarán. En el sector central, donde se desarrollan las Vegas del Yaucha, la topografía está suavizada por la depositación de la Asociación Piroclástica Pumicea, la cual fue posteriormente modificada principalmente por procesos glaciarios y luego fluviales.

De la misma manera en que se distingue una diferencia topográfica, asociada a esta se observa un cambio de las geoformas dominantes. Mientras que en el sector occidental predominan los glaciares de roca, lóbulos de soliflucción y depósitos morénicos diversos, hacia la mitad oriental de la zona de estudio, los mismos desaparecen. En este último sector, toman predominancia los taludes, así como también se observa un mayor desarrollo de las geoformas fluviales como planicies y terrazas fluviales.

## **OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**

Los objetivos del trabajo son calcular de manera preliminar y estimativa el volumen de agua contenido en forma de hielo en las geoformas glaciarias y criogénicas que aportan a las cuencas del río Tunuyán y del río Diamante, junto con la delimitación de la zona geocriogénica, según los criterios de Corte (1983).

Para cumplir con el objetivo previsto se ha procedido con la siguiente metodología:

- 1) En un primer paso, fue necesaria la realización de un mapa geomorfológico de escala 1:30.000, haciendo énfasis en la identificación de geoformas de origen glaciario a partir de la identificación e interpretación en el campo, la utilización de imágenes satelitales Sentinel, Aster y Landsat, y modelos de elevación digital SRTM y Alos-Palsar.

En la confección del mapa geomorfológico se distinguió, dentro de los glaciares de roca, su grado de actividad (activos, inactivos y fósiles). Esta diferenciación fue utilizada más adelante para determinar el volumen de hielo presente en cada uno.

2) El paso siguiente consistió en calcular, a través de las herramientas disponibles en el programa ArcGis 10.5 (donde se llevó a cabo la confección del mapa geomorfológico), la superficie correspondiente, en  $\text{km}^2$ , a cada polígono que representa a un glaciar de roca.

3) Como base para las estimaciones siguientes, fue necesario obtener el volumen de cada glaciar de roca. Para ello se tomaron los resultados obtenidos en el programa ArcGis 10.5, y fueron volcados en una planilla Excel, que permitió la aplicación de fórmulas más complejas.

El volumen (V) total de los glaciares de roca es función del área (A) de los mismos (obtenida en el punto anterior), multiplicada por su espesor (H).

$$V = H * A \quad (1)$$

Dado que se carece de este último dato, ya que no es posible realizar las mediciones de campo, se ha aplicado una fórmula empírica, tomada de los estudios de Brenning (2005). En su estudio sobre los controles geomorfológicos y climáticos de los glaciares de roca en Los Andes Centrales de Chile, utiliza una regla empírica dada por Barsch (1977c) para los Alpes suizos, junto con los datos de campo obtenidos en su trabajo, para obtener la siguiente fórmula:

$$H[\text{m}] = c * (A[\text{km}^2])^\beta \quad (2)$$

Donde  $c = 50$  y  $\beta = 0.2$ , obteniéndose:

$$H[\text{m}] = 50 * (A[\text{km}^2])^{0.2} \quad (3)$$

Una vez calculado el parámetro H a partir de la ecuación (3), el mismo fue ingresado en la ecuación (1) para obtener el volumen correspondiente a cada glaciar de roca.

4) El contenido de hielo de los glaciares de roca varía respecto de diversos factores. En este caso, se han agrupado a dichas geoformas según el grado de actividad. Es decir, que una vez obtenido el volumen de cada glaciar de roca, se realizó la sumatoria de todos los volúmenes clasificándolos según sean activos, inactivos o fósiles.

5) A partir de los volúmenes obtenidos para cada conjunto de glaciar de roca, se procedió a estimar el contenido de hielo, tomando un volumen del 50% para glaciares de roca activos, 25% y 10% para inactivos y 5% para fósiles. Con los resultados obtenidos se procedió a realizar la sumatoria del volumen total de hielo presente en la zona.

6) Por último, una vez obtenidas las estimaciones de hielo total, se utilizó un valor de  $900 \text{ kg/m}^3$  como densidad del hielo, para convertir los valores calculados en el contenido de agua equivalente almacenada.

$$V_{\text{AGUA EQUIVALENTE}} = V_{\text{HIELO}} * 0,9$$

7) Esta misma metodología se repitió para calcular el volumen de los cuerpos de hielo identificados (tanto glaciares descubiertos como cubiertos). En este caso, los coeficientes  $c$  y  $\beta$  de la ecuación (2) utilizados fueron 28,5 y 0,357 respectivamente. Estos parámetros fueron tomados del inventario de Janke et al., (2017), quienes

realizaron una estimación del agua almacenada en la cuenca del río Aconcagua, Chile, a partir de la fórmula propuesta por Chen y Ohmura (1990). A continuación, se estimó el volumen total de cada cuerpo de hielo. Por último, para los glaciares descubiertos, se tomó el 100% del volumen total obtenido previamente como volumen de hielo presente, mientras que para los glaciares cubiertos, se estimó un contenido del 85% de hielo presente. Para calcular el volumen de agua equivalente, la densidad del hielo también ha sido tomada como 900 kg/m<sup>3</sup>.

## EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS DEL AMBIENTE PERIGLACIARIO

La meteorización física representa la principal causa de disgregación de las rocas en la zona, mediante la reiteración de ciclos de congelamiento y descongelamiento (crioclastismo). Durante los estudios de campo se han encontrado numerosos ejemplos de este tipo de proceso, tanto para clastos menores como para bloques de gran tamaño (Fig. 2) susceptibles a ser movilizados.



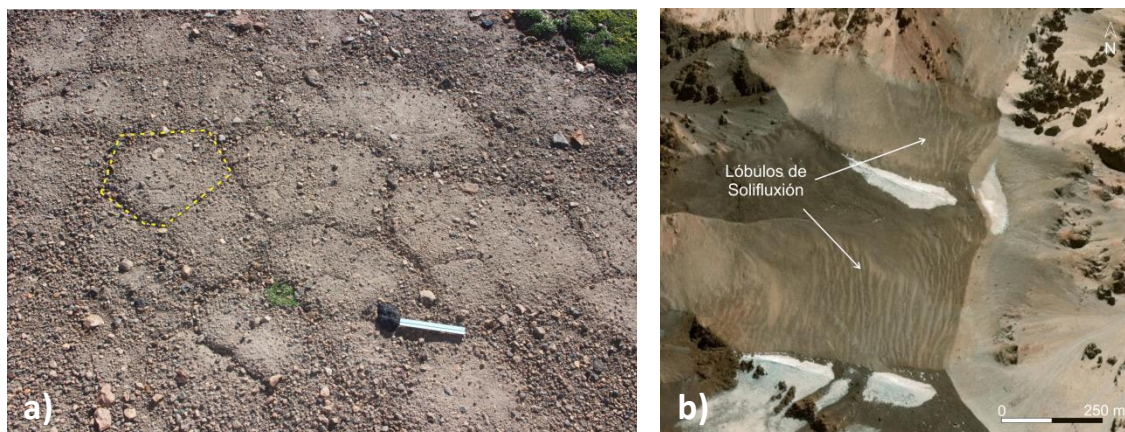
**Figura 2.** Clastos fragmentados por crioclastismo.

Las principales geoformas reconocidas en la zona de estudio que evidencian el ambiente periglaciario son: suelos poligonales, listas de piedra, lóbulos de soliflucción, protalus rampart y glaciares de roca. En todos los casos, se los encuentra dentro del sector occidental de la zona de estudio, tanto al norte como hacia el sur, exceptuando el valle central.

A lo largo del área de estudio, las listas de piedra se observan principalmente en el sector occidental de la zona de estudio, dentro de la zona geocriogénica y hacia el sector exterior de la caldera Diamante, no observándose estos procesos dentro de la misma, donde sí puede verse el desarrollo de suelos poligonales (Fig. 3a). Por su parte, los lóbulos de soliflucción son más abundantes en aquellas laderas con orientaciones hacia el norte y noroeste, ya que la mayor insolación produce mayor número de ciclos de congelamiento y descongelamiento, aunque también es posible encontrar algunas zonas con orientación hacia el suroeste (Fig. 3b).

Respecto de la inclinación de las pendientes sobre las cuales se desarrollan, no se observa un patrón determinado, ni en el caso de las ladera con reptaje, ni para los lóbulos de soliflucción, siendo que se pueden observar tanto en pendientes suaves (3° a 5°) como más moderadas (30° a 35° aproximadamente).





**Figura 3.** a) Fotografía de campo donde se observa el desarrollo de suelos poligonales.  
b) Imagen Satelital donde se identifican lóbulos de soliflucción.

En este trabajo, el término ‘protalus rampart’ ha sido utilizado para designar aquellas acumulaciones de detritos angulosos de mayor tamaño producto de diversos procesos, las cuales no se han desarrollado como geformas mayores. Es decir, si bien es posible identificar estas acumulaciones de detritos como cuerpos independientes, los mismos carecen de características morfológicas distintivas que permitan diferenciarlos de geformas tales como depósitos morénicos, glaciares de roca u otros depósitos de remoción en masa.

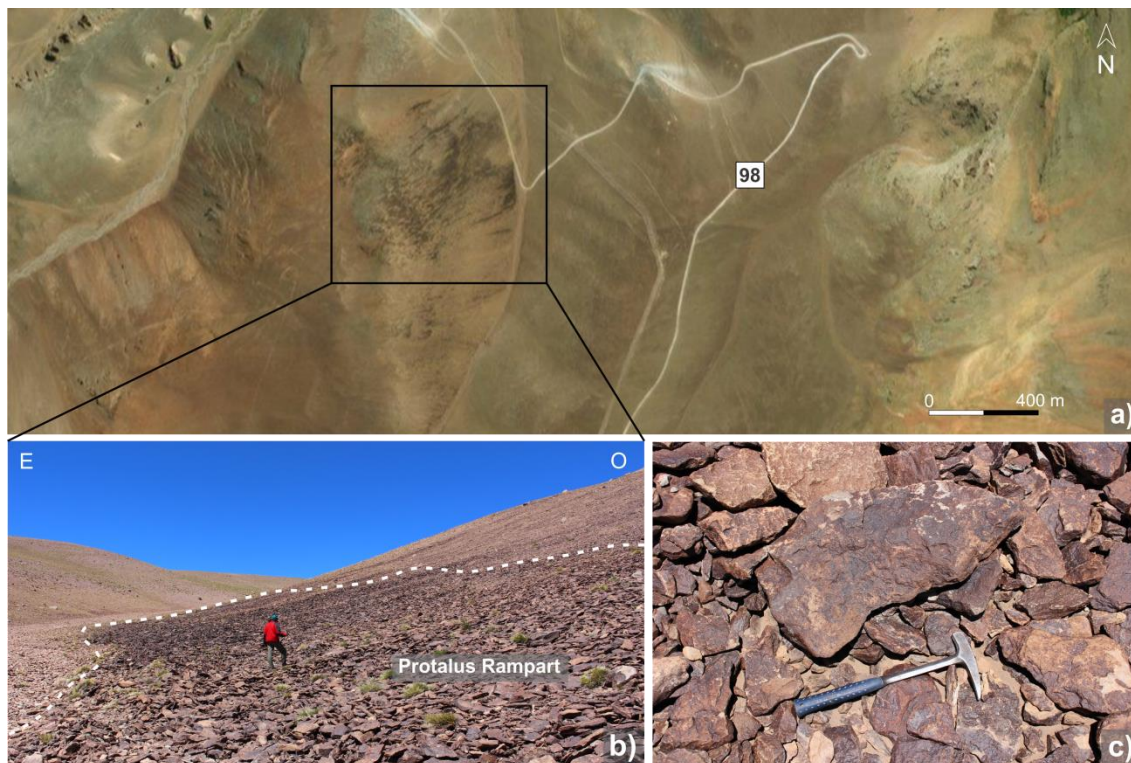
En la zona de estudio, se encuentran en el sector oeste de la misma, en especial en los sectores noroeste y suroeste. La mayoría de estas formas se presentan como rampas desarrolladas sobre las laderas, no necesariamente al pie de ellas, aunque se han encontrado casos donde es posible distinguir, a través de las imágenes satelitales, pequeñas crestas.

En el campo se ha documentado la presencia de un protalus rampart, ubicado de manera adyacente al lado izquierdo de la ruta provincial 98 (Fig. 4a). El mismo se encuentra al pie de la ladera, donde se produce un quiebre en la pendiente (Fig. 4b). Se distingue por los clastos de mayor tamaño, los cuales poseen una coloración marrón rojiza, que los diferencia de los detritos circundantes (Fig. 4c). Esta coloración se conoce como pátina del desierto y es producto de la mayor exposición a la intemperie de estos fragmentos. Se puede observar la diferencia de tamaño entre los clastos, y de manera subyacente, sedimentos finos arenosos.

Respecto de las geformas principales de estudio en esta área, se han identificado un total de 242 glaciares de roca, dentro de los cuales 103 son glaciares de roca activos, 77 inactivos y 62 fósiles. Algunos de estos ejemplares son consistentes con los encontrados en el Inventario Nacional de Glaciares, realizado por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Dentro de los informes presentados para la cuenca del río Diamante y la cuenca del río Tunuyán, ambos publicados en el año 2018, se han inventariado numerosos glaciares de escombros que también han sido reconocidos en este trabajo.

De todas formas, de acuerdo con los parámetros establecidos en dicho relevamiento, los glaciares de roca menores a una hectárea no son tenidos en cuenta. Es por esta razón que en este trabajo se han identificado 80 glaciares de roca adicionales (sin tener en

cuenta los glaciares de roca fósiles), ya que no se ha considerado un límite respecto de su extensión.

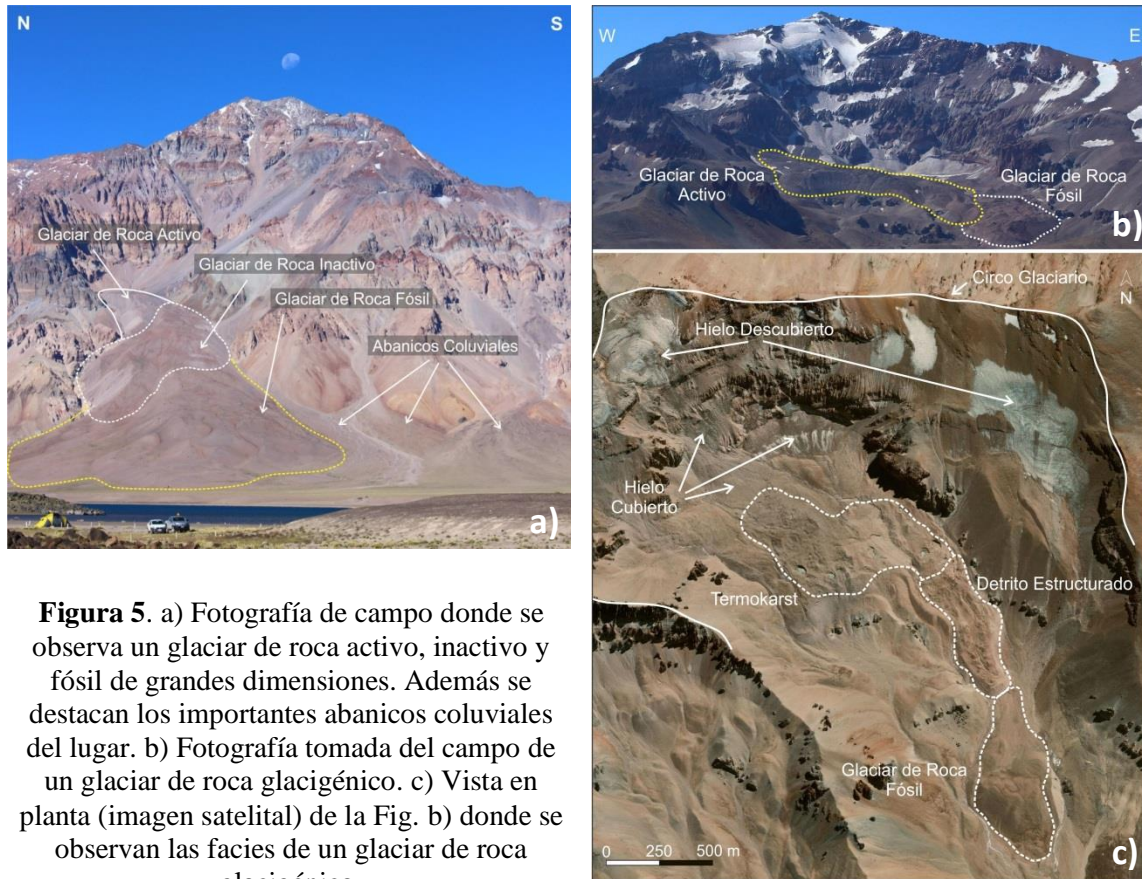


**Figura 4.** a) Imagen satelital donde se observa un protalus rampart, al costado de la ruta provincial 98. b) Fotografía tomada en el campo, donde se puede ver la acumulación de detritos al pie de la ladera, identificados por su coloración más oscura (delimitado en línea punteada blanca). c) Fotografía que muestra en detalle el tamaño de los bloques y su color característico.

Para su reconocimiento respecto del grado de actividad, se han tenido en cuenta dos factores principales: el estado del frente del glaciar de roca y las evidencias de avance del mismo. Los glaciares de roca glaciogénicos activos están bien definidos respecto de su entorno, ya que poseen un frente abrupto y surcos laterales que los separan de las laderas de los valles. Además, son notorias las crestas longitudinales y transversales producidas por el avance de los glaciares de roca. Todas estas características permitieron un fácil reconocimiento del estado de actividad de estas geoformas.

Sin embargo, para los glaciares de roca inactivos y fósiles estas premisas no se cumplen: en el primer caso, las crestas se observan desdibujadas y los frentes redondeados, por lo que se vuelve dificultoso discernir en algunos casos entre éstos y los depósitos morénicos basales. En el segundo caso, dichas características se ven aún menos definidas en los glaciares de roca fósiles, por lo que la dificultad de la distinción entre éstos y los depósitos morénicos basales, aumenta, especialmente, dado que ambas geoformas se presentan usualmente como formas que se desarrollan a lo largo del fondo de los valles. Asimismo, los glaciares de roca criogénicos (que se ubican a los pies de las laderas), pueden confundirse con morenas laterales.

Una característica observada en los glaciares de roca glaciogénicos es que la mayoría de los glaciares de roca inactivos se ubican muy próximos, o a continuación de glaciares de roca activos (Fig. 5a). En los glaciares de roca desarrollados sobre los principales circos en el sector noroeste y suroeste, se observan la mayoría de las facies definidas por Corte (1976a) para un glaciar de roca glaciogénico (Fig. 5b): facies de hielo descubierto, hielo cubierto, hoyos de termokarst y detrito estructurado. Sin embargo, en lugar de un glaciar de roca inactivo, en este caso se encuentra un glaciar de roca interpretado como fósil.



**Figura 5.** a) Fotografía de campo donde se observa un glaciar de roca activo, inactivo y fósil de grandes dimensiones. Además se destacan los importantes abanicos coluviales del lugar. b) Fotografía tomada del campo de un glaciar de roca glaciogénico. c) Vista en planta (imagen satelital) de la Fig. b) donde se observan las facies de un glaciar de roca glaciogénico.

## ESTIMACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN GLACIARES DE ROCA

Para realizar los cálculos respecto del volumen de hielo presente, muchos autores dividen los glaciares de roca en dos grupos: por un lado, consideran los glaciares de roca activos e inactivos dentro de un solo conjunto denominado “intactos”, separándolos de aquellos glaciares de roca fósiles. Las estimaciones son llevadas a cabo a partir del primer grupo, considerando a ambos grados de actividad equivalentes. Para este conjunto en general, suele utilizarse un valor estimativo del 50% de hielo presente. Por otra parte, los glaciares de roca fósiles se asumen como una acumulación de detritos sin contenido de hielo presente.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la inactividad de los glaciares de roca puede ser explicada por: causas climáticas, en donde el hielo se ha derretido; o causas dinámicas. Estas últimas pueden ser el resultado de diversos factores, como ser la

reducción en el aporte de detritos del talud y/o de hielo a medida que el glaciar de roca se extiende demasiado lejos de la cabecera (p. ej., Kellerer-Pirklbauer y Rieckh, 2016). Por lo tanto, y sobre todo teniendo en cuenta las causas climáticas, queda en evidencia que no es posible considerar que los glaciares de roca inactivos poseen la misma cantidad de hielo interno que los glaciares de roca activos.

Es por esto que en el presente trabajo se consideraron los glaciares de roca activos e inactivos por separado. Por otra parte, tampoco se ha utilizado una clasificación específica de un autor en particular, sino que se consideraron los valores más adecuados para cada grado de actividad.

Para los glaciares de roca activos, se ha considerado un volumen de hielo correspondiente al 50% del volumen total, dado que es el valor usual utilizado en estudios de este tipo, consistente con los datos in situ derivados de diferentes regiones climáticas en todo el mundo. Para los glaciares de roca inactivos, se ha utilizado una clasificación que se considera más adecuada. Janke et al. (2017), aporta un sistema de clasificación que representa las condiciones glaciogénicas de los Andes Centrales de Chile. Si bien en dicho estudio se incluyen los glaciares cubiertos y descubiertos, en este caso se han utilizado los valores de la clase 5, la cual Jones et al., (2019) considera equivalente a los glaciares de roca inactivos. La misma supone entre 10% y 25% de hielo intersticial. La clase 6, atribuida a los glaciares de roca fósiles, posee menos de 10% del hielo en volumen, donde el glaciar de roca consiste principalmente en una acumulación de detritos que puede presentar pequeños núcleos de hielo aislados dentro del mismo.

Por otra parte, es importante aclarar las incertidumbres propias del método aplicado. Por un lado deben considerarse los errores humanos inducidos al momento de la identificación de los cuerpos de interés y designación del grado de actividad.

A lo anteriormente descrito se suma el grado de incertidumbre asociada a los parámetros  $c$  y  $\beta$ . Variable determinada por varios parámetros que varían entre glaciares (por ejemplo, topografía basal, parámetros de deslizamiento, parámetros de flujo de hielo).

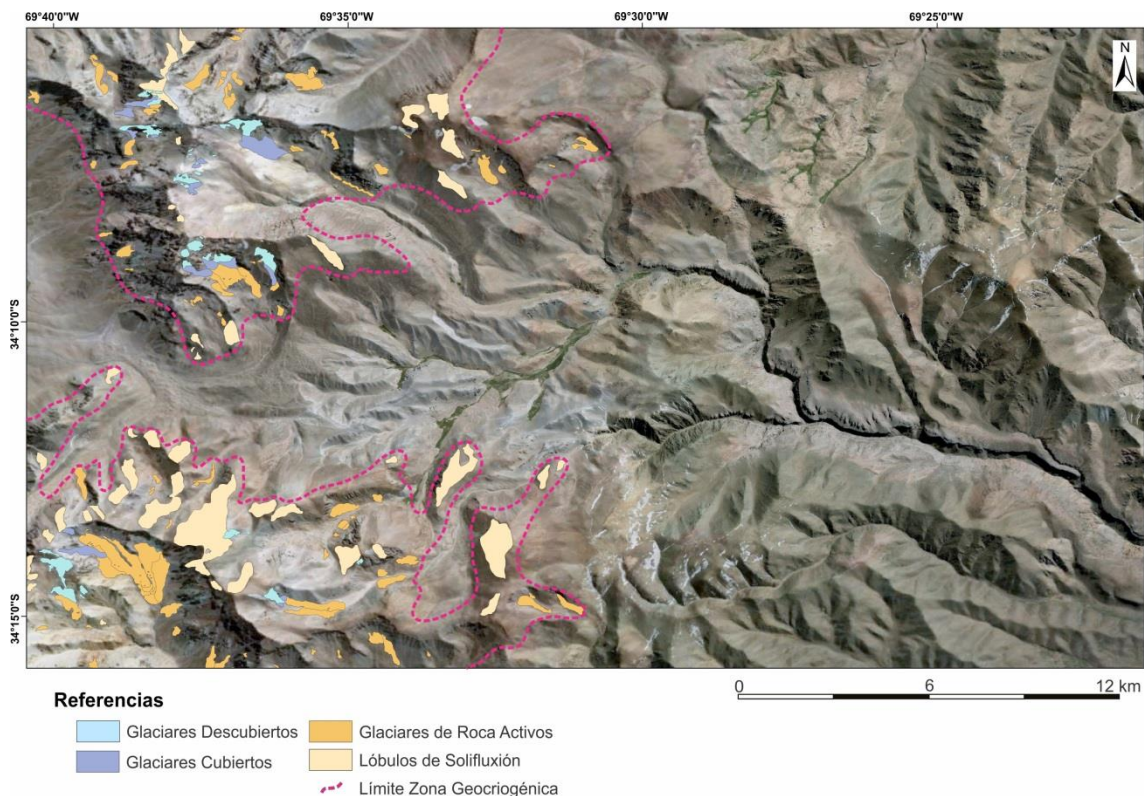
En conclusión, el uso de tales métodos con respecto a los glaciares de roca requiere una evaluación cuidadosa y crítica (Jones et al., 2019).

## **RESULTADOS**

El límite inferior de la zona geocriogénica fue definido a partir de las geoformas mencionadas, las cuales oscilan entre los 3500 y 3600 m s.n.m. Puede notarse que los glaciares de roca activos se ubican a mayores altitudes que los lóbulos de soliflucción en la mayoría de los casos (Fig. 6). De todas maneras, la altitud de los mismos es concordante con la ubicación menos elevada de los glaciares de roca. Estos valores son levemente mayores al expuesto por Corte (1983a), de 3200 m s.n.m. para los Andes de San Juan y Mendoza.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para los volúmenes de hielo presenten tanto para los glaciares (cubiertos y descubiertos) como para los glaciares de roca, diferenciados según su grado de actividad (Tabla 1). Adicionalmente a los valores totales, se ha graficado el porcentaje que aporta cada geoforma al volumen total de hielo presente (Fig. 7). Puede observarse primeramente, que el 19% de hielo total conforma

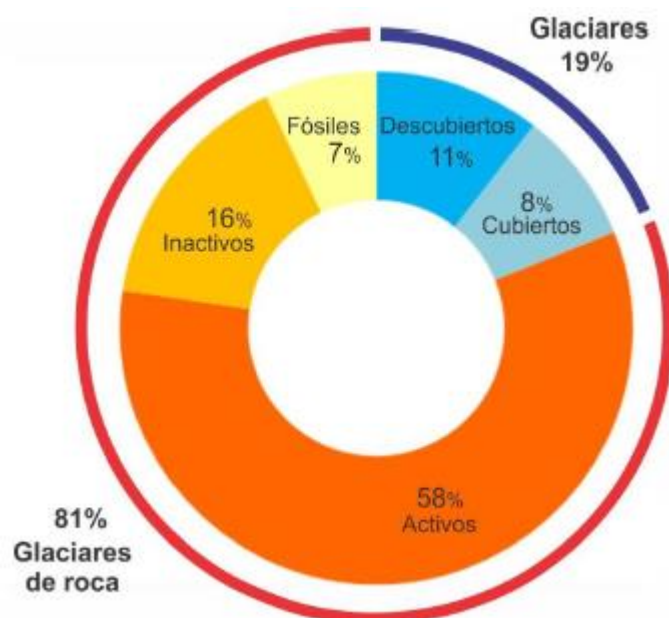
los glaciares (siendo la sumatoria de 11% y 8% correspondiente a los glaciares descubiertos y cubiertos respectivamente), mientras que el 81% restante está almacenado en los glaciares de roca (siendo la sumatoria del 58% 16% y 7% de hielo aportado por los glaciares activos, inactivos y fósiles respectivamente).



**Figura 6.** Imagen satelital donde se observan glaciares de roca activos y lóbulos de solifluxión, los que delimitan la zona geocriogénica.

Geoforma	Superficie Ocupada (km <sup>2</sup> )	Volumen de hielo (km <sup>3</sup> )	Volumen de Agua Equivalente (km <sup>3</sup> )	Valor Porcentual
Glaciar Descubierto	2,07	0,029	0,026	11
Glaciar Cubierto	1,68	0,023	0,021	8
<b>Subtotal</b>	<b>3,75</b>	<b>0,052</b>	<b>0,046</b>	<b>19</b>
Glaciar de Roca Activo	8,9	0,160	0,144	58
Glaciar de Roca Inactivo	5,1	0,043	0,038	16
Glaciar de Roca Fósil	9,3	0,019	0,017	7
<b>Subtotal</b>	<b>23,3</b>	<b>0,221</b>	<b>0,199</b>	<b>81</b>
<b>Total</b>	<b>27,05</b>	<b>0,273</b>	<b>0,246</b>	

**Tabla 1.** Volumen de hielo y agua equivalente total dentro de la zona de estudio, discriminada según cada geoforma. Se indica además el valor porcentual que representan.



**Figura 7.** Valor porcentual que representa cada geoforma respecto del volumen de hielo total.

## CONCLUSIONES

Del estudio realizado se desprende que el aporte de los glaciares de hielo y glaciares de roca a las cuencas del río Diamante y Tunuyán es de 57 hm<sup>3</sup> y 190 hm<sup>3</sup> de agua, respectivamente. Esto suma un total de 247 hm<sup>3</sup> de agua, lo que equivale al 160% del volumen de agua existente en el embalse El Carrizal a principios de 2021. Se debe tener en cuenta que estos valores corresponden sólo a una pequeña porción de las cuencas analizadas, por lo que en su totalidad se estaría en presencia de importantes cantidades de hielo como reservas de agua dulce.

Una de las observaciones más destacables corresponde al volumen total de hielo almacenado en los glaciares de hielo en comparación con los glaciares de roca. Según los resultados obtenidos, el volumen de hielo almacenado en los glaciares de roca equivale aproximadamente a 4 veces el volumen presente en los glaciares de hielo. Esto refleja que, a pesar de que los glaciares de roca poseen significativamente menor cantidad de hielo en comparación con los glaciares, son mucho más frecuentes y de mayor volumen. Es decir, que poseen una mayor relevancia respecto al parámetro de almacenamiento. Esto denota la importancia de la criósfera como reserva hídrica estratégica en un contexto de cambio climático y déficit hídrica.

Por último, se estimó que los glaciares de roca activos ocupan solamente el 5% del área total de la zona geocriogénica, lo que implica la importancia de la preservación de toda esta área, no solo los glaciares de roca, ya que estas geoformas sólo contribuyen a un ínfimo porcentaje.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. Víctor Duran y su equipo, con quienes se compartió los trabajos de campo y al personal de Guardaparques de la Reserva Natural Laguna Diamante.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Barsch, D. 1977c. Eine Abschätzung von Schuttproduktion und Schutttransport im Bereich aktiver Blockgletscher der Schweizer Alpen. *Geomorphology* 28:148–160.

Brenning, A. 2005. Climatic and Geomorphological Controls of Rock Glaciers in the Andes of Central Chile: Combining Statistical Modelling and Field Mapping. Humboldt-Universität zu Berlin, 153 p., Germany.

Chen, J. y Ohmura, A. 1990. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. En: Lang, H., Musy, A. (eds.), *Hydrology in Mountainous Regions. Hydrological Measurements*. IAHS Press Publications 127–135, Gran Bretaña.

Corte, A.E. 1976. Rock glaciers. *Bulletin Periglacial* 26: 175-197.

Corte, A.E. 1983a. Los conceptos: Geocriogénico – Parageocriogénico y Glacial – Paraglacial en los Andes Centrales de Argentina. Actas "Primera Reunión del Grupo Periglacial Argentino" Subcomisión Latinoamericana sobre la Importancia de los Procesos Periglaciales, International Geographical Union 48-56, Mendoza.

IANIGLA–CONICET, 2018a. Informe de la Cuenca del Río Diamante, provincia de Mendoza. Inventario Nacional de Glaciares, 71 p.

IANIGLA–CONICET. 2018b. Informe de las subcuencas de los ríos Palomares Salinillas, Colorado, cajón río Tunuyán y arroyo San Carlos (Tunuyán sur), provincia de Mendoza. Inventario Nacional de Glaciares, 71 p.

Janke, J.R., Ng, S. y Bellisario, A. 2017. An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology* 296: 142-152.

Jones, D. B; Harrison, S.; Anderson, K. y Whalley, W. B. (2019). Rock glaciers and mountain hydrology: A review. *Earth-Science Reviews* 193 (2019) 66–90.

# IDENTIFICACIÓN DEL TIEMPO DE ARRIBO DE LA ONDA P PARA EVENTOS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN ROCAS TIPO BASALTO

Alejandra Vesga-Ramírez <sup>ab</sup>, M. Eduardo Zitto <sup>c</sup>, Dino Filipussi <sup>ad</sup>, Emilio Camilion <sup>e</sup>, Rosa Piotrkowski <sup>cf</sup>, Martín Gómez <sup>ab</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Ondas Elásticas, ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA

<sup>b</sup> Grupo de Emisión Acústica, FRD, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA

<sup>c</sup> Departamento de Matemática, FIUBA, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

<sup>d</sup> Departamento de Física, ECyT-UNSAM, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

<sup>e</sup> YPF-Tecnología, La Plata, ARGENTINA

<sup>f</sup> ITECA UNSAM-CONICET, Centro de Matemática Aplicada, ECyT-UNSAM,

Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

e-mail: [alejandravesga@cnea.gov.ar](mailto:alejandravesga@cnea.gov.ar)

## RESUMEN

*La dependencia y exactitud del tiempo de arribo de la onda P es de inmensa importancia en la localización de eventos de Emisión Acústica (EA). Esta tarea puede ser realizada visualmente por analistas, sin embargo, el picking manual de esta onda P conlleva tiempo y la precisión depende de la experiencia y la subjetividad del analista. Asimismo, grandes volúmenes de datos de EA requieren un método confiable y automático para identificar el tiempo de arribo de la onda P, cuando este no es fácilmente identificable. Además, el ruido estacionario y de fondo a menudo impactan negativamente en las señales de EA, haciendo la identificación aún más difícil. Este trabajo presenta los resultados de la identificación de la onda P aplicando el criterio de información Akaike (AIC) sobre los modos obtenidos con el método Descomposición Empírica en Modos por Conjuntos (EEMD). Se utilizó como fuente de EA la rotura de minas de lápiz en la superficie de muestras de roca tipo Basalto y se midieron las ondas elásticas propagadas. Además, las frecuencias de las señales obtenidas fueron determinadas mediante el espectro de Fourier y la transformada de Hilbert-Huang. Los resultados de la evaluación del tiempo de arribo de las ondas P muestran que el criterio de identificación con el método AIC-EEMD tiene mayor precisión con respecto al de picking manual. Esto se debe a que al filtrar los modos de más alta frecuencia se logra eliminar el ruido que enmascara el arribo de la onda P en la señal de EA completa.*

*Palabras Clave:* Emisión acústica, Picking, AIC, EEMD, HHT

## INTRODUCCIÓN

La Emisión Acústica (EA) es un fenómeno en el cual un material sujeto a tensión, libera energía en forma de ondas elásticas (Aggelis, 2021; Calabrese & Proverbio, 2020; Casals et al., 2021); Esta liberación de energía puede ser atribuida a la deformación mecánica y fracturas en el material, así como también a cambios de fase, corrosión, fricción y procesos magnéticos entre otros (Grosse, C. U., 2021; Hesser et al., 2021). Localizar estas fuentes de EA se ha convertido en una de las principales herramientas para el monitoreo de microfracturas y coalescencia de fracturas en áreas como la minería, la ingeniería civil, las industrias de petróleo y gas y otras áreas vinculadas con la geomecánica (Calabrese & Proverbio, 2020; Feng, 2017; Gaci, S., Hachay, O., & Nicolis,



2021; K. Wang et al., 2021; Zhou et al., 2020, 2021). Sin embargo, una de las principales fuentes de error en la localización de fuentes de EA es la precisión en la identificación del tiempo de arribo de la onda P. Mientras que el picking de la onda P puede ser realizado manualmente, en un largo número de señales de EA esto puede llevar bastante tiempo. Motivados por esto, muchas investigaciones han trabajado en la automatización del picking de la onda P (Shang et al., 2022; H. Zhang et al., 2003; J. L. Zhang & Sheng, 2020). Sin embargo, las señales de EA a menudo están superpuestas con ruidos de alta frecuencia, los cuales podrían reducir la precisión de la identificación de la onda P.

En este trabajo proponemos un nuevo método de identificación de la onda P en señales de EA aplicando el criterio de información Akaike (AIC) sobre los modos obtenidos con el método Descomposición Empírica en Modos por Conjuntos (EEMD- *Ensemble empirical mode decomposition*). La precisión fue evaluada en señales de EA recibidas de la rotura de minas de lápiz en la superficie de una muestra de roca tipo Basalto. Los resultados muestran que el identificador del tiempo de la onda P, AIC-EEMD tiene mayor precisión con respecto al picking manual.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A continuación, se presenta en detalle los fundamentos teóricos que soportan el método propuesto. El método Descomposición Empírica en Modos por Conjuntos- (EEMD) y el criterio de información Akaike (AIC).

### Descomposición Empírica en Modos por Ensamblados (EEMD)

La descomposición empírica en Modos (EMD, del inglés Empirical Mode Decomposition) es un método adaptativo para el análisis de señales no lineales y no estacionarias (Huang et al., 1998; Zitto et al, M. E., 2020). Este método descompone cualquier señal completa en una porción residual y varias funciones intrínsecas de modos denominadas IMF por sus siglas en inglés (Toma et al., 2021). Una señal debe satisfacer dos condiciones para ser considerada una IMF, 1) la cantidad de puntos extremos (máximos y mínimos) y la cantidad de cruces por cero deben ser iguales o diferir a lo sumo en uno y 2) la media local, definida como el valor medio de las envolventes superior e inferior, debe ser nula para todo punto (Colominas et al., 2011).

El método basado en EMD ha sido satisfactoriamente aplicado para el análisis de señales derivadas del fracturamiento de rocas en años recientes (Flynn, J. W., 2014; Siracusano et al., 2016; Zitto et al, M. E., 2020). Sin embargo, aunque la señal resultante obtenida después de realizar EMD incluye la mayor parte de la información relevante de la señal temporal sin procesar, algunas veces se experimentan problemas de presencia de oscilaciones de amplitud muy dispar en uno o más modos o de mezcla de modos, es decir una parte de la IMF puede tener oscilaciones comunes a las de los modos adyacentes (Toma et al., 2021). Para solucionar los problemas anteriormente descritos, el método Descomposición Empírica en Modos por Conjuntos (EEMD) primero obtiene varias realizaciones de la señal sumándole ruido blanco, luego a cada una de las realizaciones se calculan los modos mediante el método EMD y finalmente se promedian los resultados para obtener los modos finales de la señal (Gu & Peng, 2021). Esto ha mejorado el

desempeño del análisis de las señales en diferentes campos de aplicación (Liu, G., 2021; T. Wang et al., 2012; J. Zhang et al., 2016).

Los pasos básicos del método de EEMD son:

Paso 1: Añadir varias veces ruido blanco  $y_i(t)$  a la serie temporal original, el cual tiene una distribución normal como se muestra en la Ecuación 1

$$x_i(t) = x(t) + y_i(t) \quad (\text{Ec.1})$$

Paso 2: Después de añadir ruido blanco, la serie temporal se descompone mediante el método EMD extrayendo todas las IMF denotadas como  $c_{ij}(t)$ , y una componente residual denotada como  $r_i(t)$ , donde  $c_{ij}(t)$  representa la  $j$ -ésima IMF obtenida después que el ruido blanco es añadido por la  $i$ -ésima vez, como se muestra en la Ecuación. 2.

$$x_i(t) = \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) + r_i(t) \quad (\text{Ec.2})$$

Paso 3: Repetir paso 1 y 2 para cada realización con ruido blanco.

Paso 4: Los resultados anteriores se promedian para obtener las IMF finales por EEMD, como se muestra en la Ecuación 3.

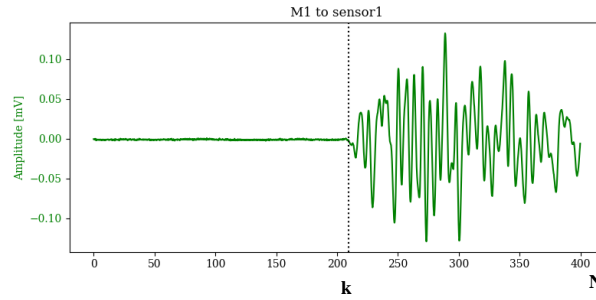
$$c_j(t) = \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) \quad (\text{Ec.3})$$

donde,  $c_j(t)$  representa el  $j$  – ésimo valor de IMF descompuesto por EEMD ( $j=1, \dots, N$ ).

### **Criterio de Información Akaike (AIC)**

El Criterio de Información Akaike (AIC, del inglés Akaike Information Criterio) fue desarrollado en 1973 por (Akaike, 1973) para estudiar el desempeño de un modelo de ajuste estadístico para un proceso autorregresivo. En estadística y procesamiento de señales, un modelo autorregresivo (AR) es una representación de un proceso aleatorio, en el que la variable de interés depende de sus observaciones pasadas. Específicamente, la variable de interés o de salida, depende linealmente de sus valores anteriores. La ventaja de este criterio es que puede eficientemente separar eventos de la misma serie de tiempo.

El criterio AIC asume que el intervalo antes y después del tiempo de arribo de la onda P son dos series de tiempo estacionarias. Un proceso estacionario tiene una media, varianza y autocorrelación que no cambia en el tiempo. La primera serie de tiempo es ruido aleatorio y la segunda serie registra un movimiento de energía sobre un intervalo adyacente, ver Fig. 1



**Figura 1.** Una muestra de la señal de un evento de EA a partir de la rotura de una mina de lápiz. El punto de separación  $k$  delimita las dos series de tiempo adyacentes con diferentes propiedades estadísticas.

El criterio AIC en la muestra  $k$  para una serie de tiempo  $x(t)$  de longitud  $N$  esta expresado como:

$$IC(k) = (k - M)\log(\sigma^2_{1,max}) + (N - M - k)(\log(\sigma^2_{2,max}) + C \quad (\text{Ec.4})$$

donde  $M$  es el orden de un proceso AR para ajustar los datos, y  $\sigma^2_{1,max}$  y  $\sigma^2_{2,max}$  son las varianzas en los intervalos de series de tiempo  $[t_1, t_K]$  y  $[t_{K+1}, t_N]$  y  $C$  es una constante. En orden de obtener los valores de AIC, el valor para  $M$  y los coeficientes AR deben ser estimados. Esto puede ser computacionalmente costoso. Sin embargo, si  $M$  es pequeño comparado con número de muestras, la ecuación 4 puede ser simplificada así:

$$AIC(k) = (k \cdot \log\{var(x[1:k])\} + (N - k - 1)(\log\{var(x[k + 1, N])\} \quad (\text{Ec.5})$$

donde  $var(x[1:k])$  es la varianza de la serie de tiempos  $x(t_1), x(t_2) \dots, x(k)$  y  $var(x[k + 1, N])$  es la varianza de la serie de tiempo  $x(k_1 + 1), x(k + 2) \dots, x(N)$ . El tiempo de arribo de la onda P es el punto donde AIC tiene un valor mínimo. El algoritmo AIC es robusto en presencia de ruido con alta amplitud, computacionalmente rápido, el cual puede ser implementado automáticamente (Cavanaugh, 2019; St-Onge, 2011; Suhendi et al., 2019; J. L. Zhang & Sheng, 2020) . Para señales de microsismica/EA donde la onda P es claramente identificable, el AIC es muy útil. Sin embargo, cuando no es claramente identificable, el criterio AIC puede tener grandes errores. Por esta razón es necesario aplicar el AIC en análisis multiescala para reducir el efecto del ruido.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

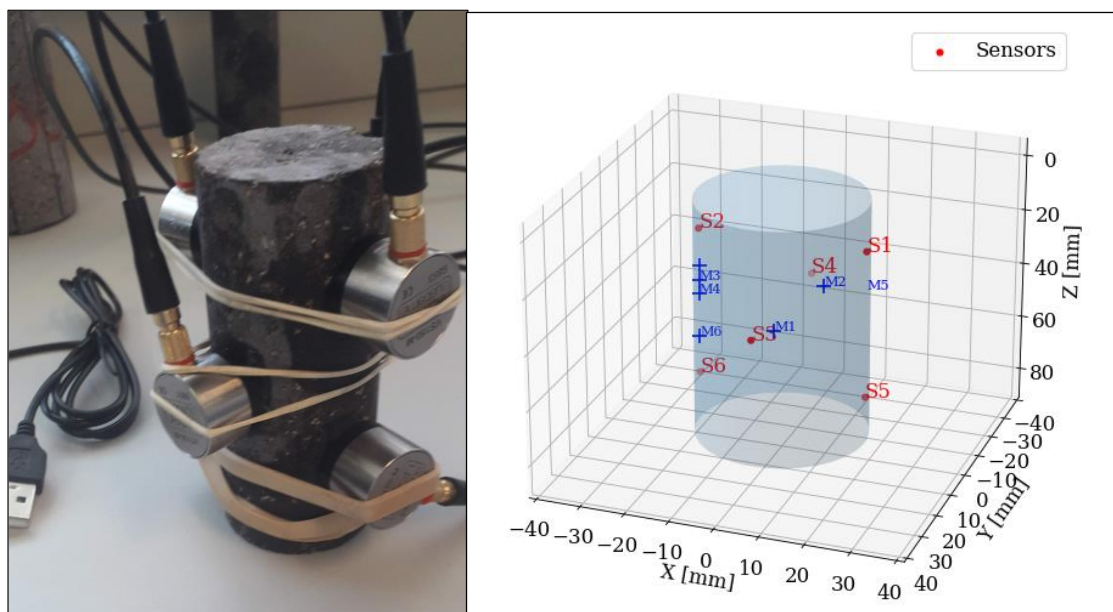
El ensayo se realizó sobre una probeta de roca tipo basalto del volcán Peteroa (Argentina) con dimensiones de 89.94 mm de largo y diámetro de 37.93 mm. Seis (6) sensores de emisión acústica fueron acondicionados para este ensayo, ver Fig. 2. Las coordenadas de los sensores de EA se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Coordenadas de localización de los receptores de emisión acústica

Descripción	x [mm]	y[mm]	z[mm]
Sensor 1 (S1)	19	0	15
Sensor 2 (S2)	-19	0	15
Sensor 3 (S3)	0	19	39

Descripción	x [mm]	y[mm]	z[mm]
Sensor 4 (S4)	0	-19	39
Sensor 5 (S5)	19	0	68
Sensor 6 (S6)	-19	0	68

Se utilizó un Equipo de detección de EA marca Ytasca. Los sensores de EA son tipo VS150-M de Vallen System. Su respuesta de frecuencia se caracteriza por un pico a 150 kHz donde exhibe una resonancia. Las señales de EA fueron amplificadas con un amplificador de 40dB, filtradas por un filtro pasa baja de 20kHz y un filtro pasa alta de 400kHz. Una frecuencia de 2000 muestras por segundo fue usada. El umbral de detección fue fijado en un valor de 40 dB basado en el ruido ambiental.



**Figura 2.** A la izquierda la localización de los sensores en la probeta de roca y a la derecha la posición de las diferentes fuentes de EA simbolizadas con una cruz azul.

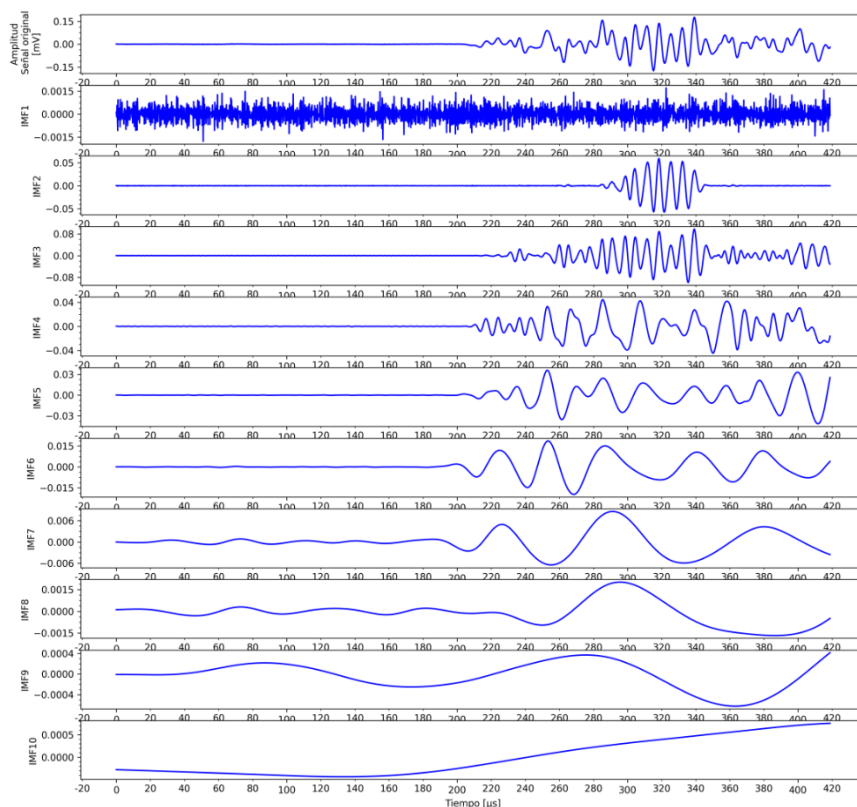
Seis (6) fuentes de EA fueron generadas en la superficie de la probeta mediante la rotura de la mina de un lápiz, las coordenadas se presentan en la tabla 2. El tamaño de la mina de lápiz HB es de 0,5 mm y fue rota a 30 ° con respecto a la superficie de la probeta.

**Tabla 2.** Coordenadas de localización de las fuentes de emisión acústica por ruptura de la mina de lápiz.

Fuente EA	x [mm]	y[mm]	z[mm]
Fuente 1 (M1)	25	30	15
Fuente 2 (M2)	5	30	15
Fuente 3 (M3)	25	30	15
Fuente 4 (M4)	5	30	15
Fuente 5 (M5)	15	0	25
Fuente 6 (M6)	15	0	5

### Criterio AIC-EEMD para la identificación de onda P

Automatizamos la identificación del arribo de la onda P haciendo uso de la combinación de dos técnicas: descomposición empírica en modos por Conjuntos (EEMD) y criterio de información Akaike (AIC). Primero para cada señal recibida en cada sensor se le realizó la descomposición empírica de modos por Conjuntos (EEMD) y se obtuvieron las IMF, ver figura 3.



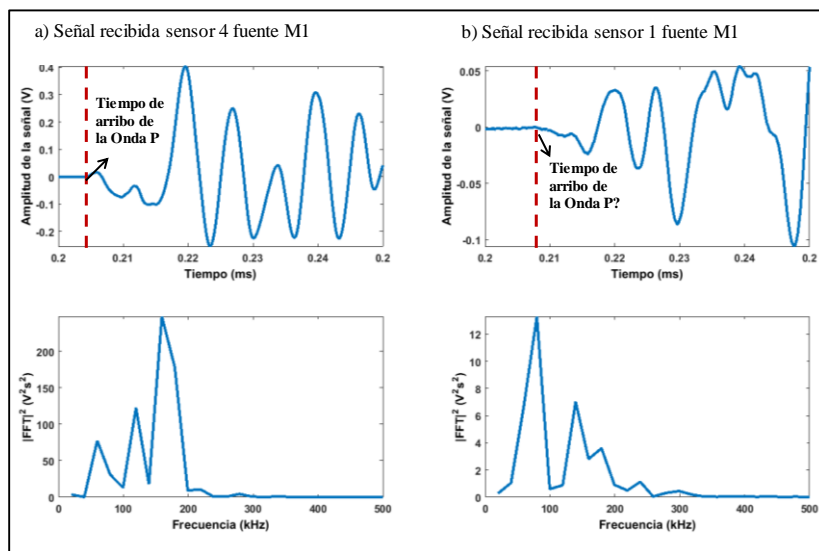
**Figura 3.** Descomposición empírica de modos por conjuntos (EEMD) para la señal recibida en el sensor 1 de la primera fuente de EA (M1).

Luego se aplicó el criterio AIC sobre cada una de las IMF y se identificó el tiempo de arribo de la onda P. Posteriormente se compararon los tiempos de arribo de la onda P con el criterio AIC-EEMD respecto al tiempo de arribo identificado manualmente en la señal original (sin aplicar las EEMD) y se seleccionaron las IMF que mejor retienen el comportamiento de la onda P. Luego se realizó la localización de las fuentes de EA con base al tiempo de la onda P identificado con picking manual y con el criterio AIC-EEMD de las IMF seleccionadas.

## RESULTADOS

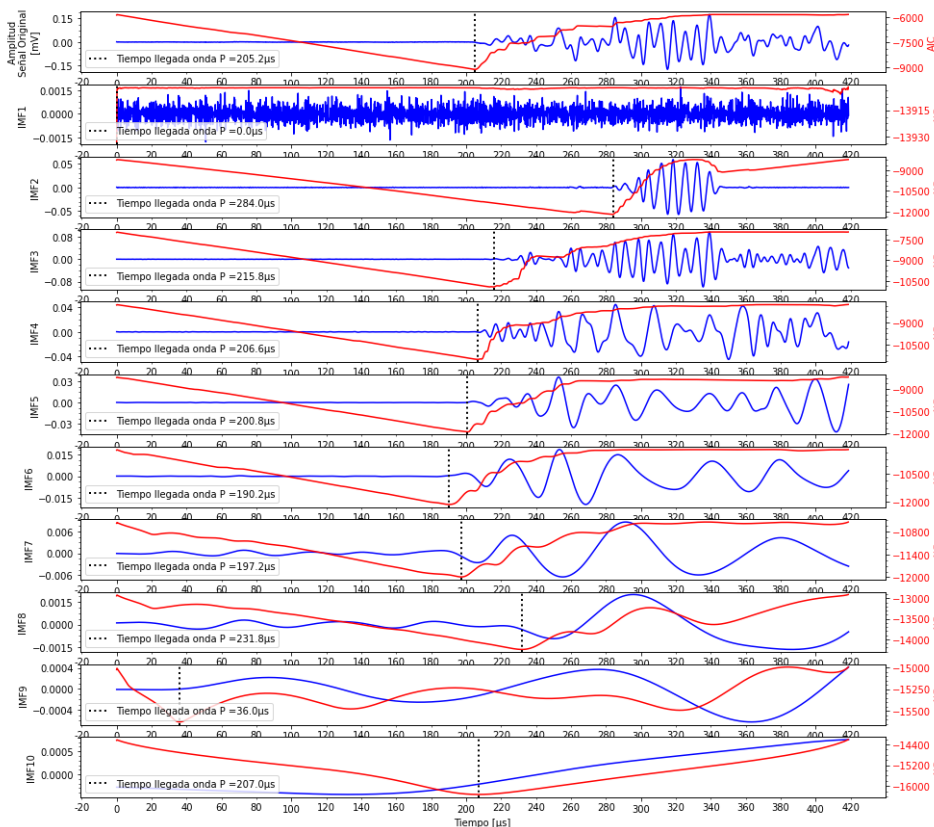
En la figura 5a se muestra un ejemplo de una señal recibida en uno de los sensores cuando se activó una de las fuentes de EA sobre la muestra, se observa claramente el tiempo de arribo de la onda P en 0,204 ms y su espectro de amplitud calculado con la transformada de rápida de Fourier (FFT). El espectro de amplitud demuestra que la

principal información de la onda P está distribuida debajo de los 300 kHz. Sin embargo, en otros casos el arribo de la onda P puede estar contaminado por ruidos espurios, haciendo más difícil la identificación de la onda P en la señal original, ver figura 5b.



**Figura 5.** Señal de una fuente de EA recibida en los sensores 3 y 4 y su espectro de amplitud. La línea vertical punteada roja corresponde al picking de llegada de la onda P realizado manualmente

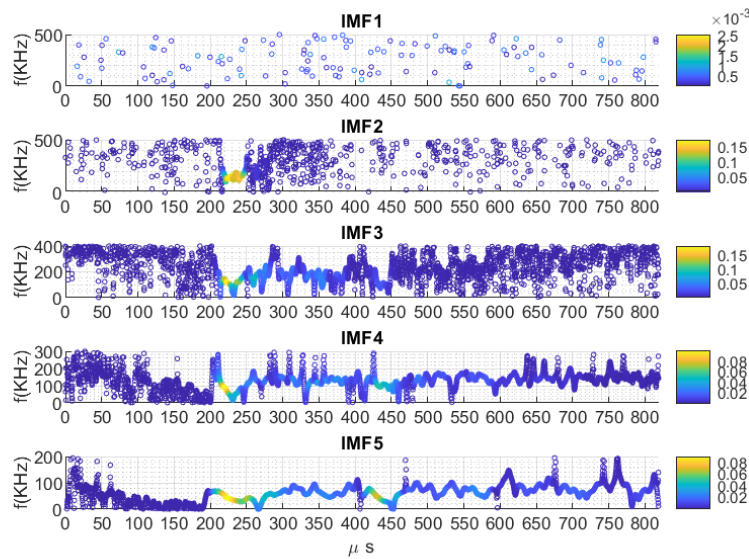
Para cada señal recibida por la activación de las fuentes de EA se obtuvieron en promedio 10 IMF, luego se aplicó el criterio AIC-EEMD y se calcularon los tiempos de arribo de la onda P, ver figura 6.



**Figura 6.** Aplicación del Criterio AIC-EEMD para la identificación del tiempo de llegada de la onda P en la señal recibida en el sensor 1 de la primera fuente de EA M1. La línea azul representa el

EEMD para la señal recibida y la línea roja representa la serie de tiempo AIC. La línea negra punteada representa el tiempo de arribo de la onda P con el criterio AIC-EEMD.

El EEMD posee la habilidad de separar las componentes de alta frecuencia y baja frecuencia. Se observó que las IMF1 e IMF2 corresponden a componentes de altas frecuencias que son muy ruidosas, algunas asociadas a la frecuencia natural del sensor que podrían producir un falso tiempo de llegada de onda P. Por otro lado, las IMF6 a IMF10 corresponden a frecuencias muy bajas en las cuales no se puede identificar claramente la llegada de la onda P. Por tanto, las IMF discutidas anteriormente no deben ser tomadas en cuenta para identificar el tiempo de arribo de la onda P. Estos resultados se pueden observar también en el espectro de Hilbert-Huang, ver figura 7.



**Figura 7.** Espectro de Hilbert-Yuang para la señal recibida en el sensor 4 de una fuente de EA

A efecto de seleccionar las IMF en las que mejor se identifica el arribo de la onda P, se compararon los tiempos estimados con el criterio AIC-EEMD en las IMF 3, IMF4 e IMF5 con respecto al picking manual, ver tabla 3. El residual sería la resta entre el tiempo identificado manualmente y cada IMF. La IMF 3 e IMF4 tienen el menor residual en comparación con el tiempo estimado manualmente.

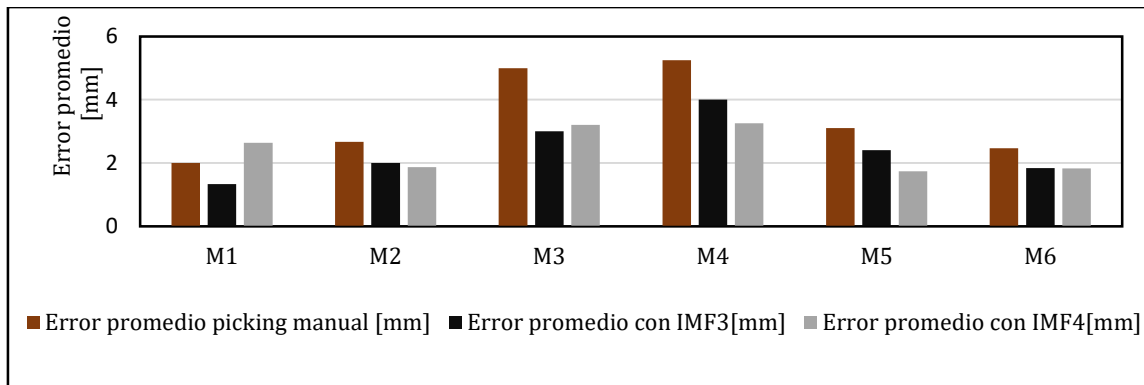
**Tabla 3.** Coordenadas de localización de las fuentes de emisión acústica por ruptura de la mina de lápiz.

Fuente EA	Sensor	Tiempo Onda P Manual (us)	AIC-EEMD IMF1 (us)	AIC-EEMD IMF2 (us)	AIC-EEMD IMF3 (us)	AIC-EEMD IMF4 (us)	AIC-EEMD IMF5 (us)	Mejor IMF
M1	Sensor1	209.6	0	242.6	211.2	211.4	203.6	IMF3
	Sensor2	201.8	209.6	204.0	200.8	198.6	194.4	IMF3
	Sensor3	195.8	0	197.2	193.2	194.8	190.0	IMF4
	Sensor4	204.0	0	211.6	203.2	201.2	191.8	IMF3
	Sensor5	206.2	0	243.0	214.2	204.6	205.2	IMF4
	Sensor6	201.4	0	208.4	202.0	201.2	199.2	IMF4

Fuente EA	Sensor	Tiempo Onda P Manual (us)	AIC-EEMD IMF1 (us)	AIC-EEMD IMF2 (us)	AIC-EEMD IMF3 (us)	AIC-EEMD IMF4 (us)	AIC-EEMD IMF5 (us)	Mejor IMF
M2	Sensor1	209.2	0	219.6	213.8	208.2	202.4	IMF4
	Sensor2	203.8	0	208.6	205.2	203.2	202.6	IMF4
	Sensor3	208.2	0	216.0	211.6	207.6	204.4	IMF4
	Sensor4	200.4	242.8	200.0	198.4	197.6	191.2	IMF3
	Sensor5	208.6	0	224.4	207.8	203.8	199.4	IMF3
	Sensor6	207.8	212.8	208.0	206.2	202.8	200.4	IMF3
M3	Sensor1	210.0	0	222.8	211.8	208.6	205.8	IMF3
	Sensor2	203.0	0	203.4	202.0	201.8	197.2	IMF2
	Sensor3	204.2	211.4	208.0	203.2	198.8	195.8	IMF3
	Sensor4	205.2	0	207.2	205.2	204.4	193.0	IMF3
	Sensor5	209.4	0	229.2	212.8	207.8	201.6	IMF4
	Sensor6	203.2	210.6	205.2	203.8	202.2	198.4	IMF3
M4	Sensor1	207.8	0	241.2	213.0	210.2	208.0	IMF4
	Sensor2	209.8	0	221.8	209.6	207.8	205.2	IMF3
	Sensor3	207.8	0	229.0	208.0	203.4	195.4	IMF3
	Sensor4	205.8	0	206.8	204.4	203.8	200.6	IMF3
	Sensor5	214.0	0	243.4	225.4	216.8	202.4	IMF4
	Sensor6	210.4	0	220.6	210.0	205.6	200.2	IMF3
M5	Sensor1	210.4	0	223.6	210.2	208.2	203.2	IMF3
	Sensor2	201.8	203.2	202.2	201.4	198.8	191.8	IMF3
	Sensor3	205.4	0	210.0	207.6	199.8	197.6	IMF3
	Sensor4	206.4	217.6	209.6	205.0	200.0	194.8	IMF3
	Sensor5	214.0	0	226.0	216.8	208.4	208.6	IMF3
	Sensor6	207.4	214.8	210.8	208.0	204.6	200.8	IMF3
M6	Sensor1	213.8	0	233.0	218.6	212.4	208.6	IMF4
	Sensor2	207.8	216.6	212.0	208.4	207.2	205.4	IMF4
	Sensor3	206.8	216.8	209.8	207.8	207.2	202.2	IMF4
	Sensor4	206.0	0	209.8	205.4	203.2	200.0	IMF3
	Sensor5	209.4	0	222.2	208.8	206.2	203.4	IMF3
	Sensor6	201.2	207.8	202.6	199.0	196.2	195.0	IMF3
M7	Sensor1	185.0	0	193.6	188.8	181.4	176.6	IMF4
	Sensor2	187.8	0	195.2	186.6	185.0	178.6	IMF3
	Sensor3	197.6	0	221.8	204.8	204.0	193.4	IMF4
	Sensor4	196.8	0	221.6	203.0	197.0	194.8	IMF4
	Sensor5	205.2	0	284.0	215.8	206.6	200.8	IMF4
	Sensor6	205.0	0	215.2	207.6	199.2	198.4	IMF3
M8	Sensor1	187.6	0	196.0	190.4	182.8	184.8	IMF3
	Sensor2	189.0	0	195.0	191.4	189.8	182.2	IMF3
	Sensor3	199.8	0	226.6	206.4	202.0	195.6	IMF4
	Sensor4	198.8	0	218.8	206.4	199.8	194.2	IMF4
	Sensor5	207.6	9	291.6	215.8	206.8	198.0	IMF4
	Sensor6	207.6	0	219.8	210.6	200.0	196.2	IMF3

Luego se estimó la precisión de localización de las fuentes de EA con base al tiempo de arribo de la onda P estimado manualmente y el tiempo de arribo estimado por el criterio AIC-EEMD en las IMF3, IMF4. La localización se realizó con el algoritmo Simulated Annealing. En todos los casos el error de localización fue menor con el criterio AIC-EEMD con alguna de las IMF que con respecto al picking manual.





**Figura 8.** Error en la localización para fuentes de EA (M1 a M6) considerando el tiempo de onda P estimado con el criterio AIC-EEMD en IMF3 e IMF4 vs la localización considerando el tiempo de la onda P manualmente en la señal completa.

## CONCLUSIONES

El criterio de identificación AIC-EEMD presentado en este trabajo toma ventaja de las IMF de las señales recibas por los sensores sobre fuentes de EA y del método AIC para identificación de la onda P. Se utilizó como fuente de EA la rotura de minas de lápiz en la superficie de muestras de roca tipo Basalto y se midieron las ondas elásticas propagadas. Los resultados preliminares de la evaluación del tiempo de arribo de las ondas P muestran que el criterio de identificación con el método AIC-EEMD tiene mayor precisión con respecto al de picking manual. Esto se debe a que al filtrar los modos de más alta frecuencia se logra eliminar el ruido que enmascara el arribo de la onda P en la señal de EA completa.

Se observó que las IMF1 e IMF2 corresponden a componentes de altas frecuencias que son muy ruidosas, algunas asociadas a la frecuencia natural del sensor que podrían producir un falso tiempo de llegada de onda P. Por otro lado, las IMF6 a IMF10 corresponden a frecuencias muy bajas en las cuales no se puede identificar claramente la llegada de la onda P. Las IMF que mejor representan la onda P son las IMF3 e IMF4.

## REFERENCIAS

- Aggelis, D. G. et al. (2021). Acoustic Emission. *Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace*.
- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *2nd International Symposium on Information Theory*, 267–281.
- 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), 1–33. <https://doi.org/10.3390/cmd2010001>
- Casals, B., Dahmen, K. A., Gou, B., Rooke, S., & Salje, E. K. H. (2021). The duration-energy-size enigma for acoustic emission. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84688-7>

- Cavanaugh, J. E. (2019). The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*.
- Colominas, M. A., Flandrin, P., & Torres, E. (2011). *Descomposicion empirica en modos por conjuntos completa con ruido adaptativo y aplicaciones biomedicas*.
- Feng, X. T. (2017). Rock mechanics and engineering: Volume 2: Laboratory and field testing. In *Rock Mechanics and Engineering: Volume 2: Laboratory and Field Testing*. <https://doi.org/10.1201/9781315364254>
- Flynn, J. W., et al. (2014). Empirical Mode Decomposition Analysis of Continuous Acoustic Emission (AE) Data from Laboratory Rock Deformation Experiments. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Gaci, S., Hachay, O., & Nicolis, O. (2021). *Methods and Applications in Petroleum and Mineral Exploration and Engineering Geology*. Elsevier.
- Grosse, C. U., et al. (2021). Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Engineering. In *Springer Nature*.
- Gu, J., & Peng, Y. (2021). An improved complementary ensemble empirical mode decomposition method and its application in rolling bearing fault diagnosis. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 113, 103050. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103050>
- Hesser, D. F., Mostafavi, S., Kocur, G. K., & Markert, B. (2021). Identification of acoustic emission sources for structural health monitoring applications based on convolutional neural networks and deep transfer learning. *Neurocomputing*, 453, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.04.108>
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Snin, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Liu, G., et al. (2021). Precise detection of early breast tumor using a novel EEMD-based feature extraction approach by UWB microwave. *Medical & Biological Engineering & Computing*.
- Shang, X., Wang, Y., & Miao, R. (2022). Acoustic emission source location from P-wave arrival time corrected data and virtual field optimization method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163(June 2021), 108129. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108129>
- Siracusano, G., Lamonaca, F., Tomasello, R., Garescì, F., Corte, A. La, Carnì, D. L., Carpentieri, M., Grimaldi, D., & Finocchio, G. (2016). A framework for the damage evaluation of acoustic emission signals through Hilbert-Huang transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75(871), 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.12.004>
- St-Onge, A. (2011). Akaike information criterion applied to detecting first arrival times on microseismic data. *Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 81st Annual Meeting 2011, SEG 2011, Figure 1*, 1658–1662.
- Suhendi, C., Sudibyoy, M. R. P., Erlangga, I. F., & Arbad, A. P. (2019). Automatic Event

Identification from Tectonic Earthquakes with Modified Akaike Information Criterion (mAIC). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 258(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012037>

- Toma, R. N., Kim, C. H., & Kim, J. M. (2021). Bearing fault classification using ensemble empirical mode decomposition and convolutional neural network. *Electronics (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/electronics10111248>
- Wang, K., Johnson, C. W., Bennett, K. C., & Johnson, P. A. (2021). Predicting fault slip via transfer learning. *Nature Communications*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27553-5>
- Wang, T., Zhang, M., Yu, Q., & Zhang, H. (2012). Comparing the applications of EMD and EEMD on time–frequency analysis of seismic signal. *Journal of Applied Geophysics*, 83, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.05.002>
- Zhang, H., Thurber, C., & Rowe, C. (2003). Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(5), 1904–1912. <https://doi.org/10.1785/0120020241>
- Zhang, J. L., & Sheng, G. Q. (2020). First arrival picking of microseismic signals based on nested U-Net and Wasserstein Generative Adversarial Network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195(February), 107527. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107527>
- Zhang, J., Peng, W., Liu, F., Zhang, H., & Li, Z. (2016). Monitoring Rock Failure Processes Using the Hilbert–Huang Transform of Acoustic Emission Signals. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(2), 427–442. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0755-5>
- Zhou, Z., Lan, R., Rui, Y., Dong, L., & Cai, X. (2021). A new algebraic solution for acoustic emission source localization without premeasuring wave velocity. *Sensors (Switzerland)*, 21(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s21020459>
- Zhou, Z., Rui, Y., Cai, X., Cheng, R., Du, X., & Lu, J. (2020). A weighted linear least squares location method of an acoustic emission source without measuring wave velocity. *Sensors (Switzerland)*, 20(11). <https://doi.org/10.3390/s20113191>
- A.P., A., K., O., & T.O., E. (2012). A Comparative Study of Simulated Annealing and Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem. *International Journal of Applied Information Systems*, 4(4), 6–12. <https://doi.org/10.5120/ijais12-450678>
- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *2nd International Symposium on Information Theory*, 267–281.
- Boniface, A., Saliba, J., Sbartaï, Z. M., Ranaivomanana, N., & Balayssac, J. P. (2020). Evaluation of the acoustic emission 3D localisation accuracy for the mechanical damage monitoring in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 223(October 2019), 106742. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106742>
- 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), 1–33. <https://doi.org/10.3390/cmd2010001>
- Cavanaugh, J. E. (2019). The Akaike information criterion: Background, derivation,

properties, application, interpretation, and refinements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*.

- Colominas, M. A., Flandrin, P., & Torres, E. (2011). *Descomposicion empirica en modos por conjuntos completa con ruido adaptativo y aplicaciones biomedicas*.
- Flynn, J. W., et al. (2014). Empirical Mode Decomposition Analysis of Continuous Acoustic Emission (AE) Data from Laboratory Rock Deformation Experiments. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Ge, M. (2003). Analysis of source location algorithms, Part II: Iterative methods. *Journal of Acoustic Emission*, 21, 29–51.  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ANALYSIS+OF+SOURCE+LOCATION+ALGORITHMS+Part+II+:+Iterative+methods#0>
- Grosse, C. U., et al. (2021). Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Engineering. In *Springer Nature*.
- Gu, J., & Peng, Y. (2021). An improved complementary ensemble empirical mode decomposition method and its application in rolling bearing fault diagnosis. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 113, 103050.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103050>
- Harnett, C. E., Benson, P. M., Rowley, P., & Fazio, M. (2018). Fracture and damage localization in volcanic edifice rocks from El Hierro, Stromboli and Tenerife. *Scientific Reports*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20442-w>
- Hesser, D. F., Mostafavi, S., Kocur, G. K., & Markert, B. (2021). Identification of acoustic emission sources for structural health monitoring applications based on convolutional neural networks and deep transfer learning. *Neurocomputing*, 453, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.04.108>
- Hu, Q., & Dong, L. (2020). Acoustic Emission Source Location and Experimental Verification for Two-Dimensional Irregular Complex Structure. *IEEE Sensors Journal*, 20(5), 2679–2691. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2954200>
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Snin, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Jones, M. R., Rogers, T. J., Worden, K., & Cross, E. J. (2022). A Bayesian methodology for localising acoustic emission sources in complex structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163(May 2021), 108143.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108143>
- Khairuddin, R., & Zainuddin, Z. M. (2019). A Comparison of Simulated Annealing Cooling Strategies for Redesigning a Warehouse Network Problem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1366(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1366/1/012078>
- Liu, G., et al. (2021). Precise detection of early breast tumor using a novel EEMD-based feature extraction approach by UWB microwave. *Medical & Biological Engineering & Computing*.
- Mahdi, W., Medjahed, S. A., & Ouali, M. (2017). Performance analysis of simulated

- annealing cooling schedules in the context of dense image matching. *Computacion y Sistemas*, 21(3), 493–501. <https://doi.org/10.13053/CyS-21-3-2553>
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines" and \* i/ ZOZL OL APPROVED FOR RELEASE DATE-\*-"7". *Journal of Chemical Physics*, 21, 1087–1092.
- Ono, K. (2014). Acoustic Emission BT - Springer Handbook of Acoustics. *Springer Handbook of Acoustics*, 1209–1229. [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-0755-7\\_30](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-0755-7_30)  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_30)
- Peprah, A. K., Appiah, S. K., & Amponsah, S. K. (2017). An Optimal Cooling Schedule Using a Simulated Annealing Based Approach. *Applied Mathematics*, 08(08), 1195–1210. <https://doi.org/10.4236/am.2017.88090>
- Prugger, A. F., & Gendzwil, D. J. (1988). Microearthquake location: a nonlinear approach that makes use of a simplex stepping procedure. *Bulletin - Seismological Society of America*, 78(2), 799–815. <https://doi.org/10.1785/bssa0780020799>
- S. Kirkpatrick; et al. (1983). Optimization: Simulated Annealing. *Optimization for Industrial Problems*, 220(4598), 165–200. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24974-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24974-7_7)
- Salinas, V., Vargas, Y., Ruzzante, J., & Gaete, L. (2010). Localization algorithm for acoustic emission. *Physics Procedia*, 3(1), 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.111>
- Shang, X., Li, X., Morales-Esteban, A., & Dong, L. (2018). Enhancing micro-seismic P-phase arrival picking: EMD-cosine function-based denoising with an application to the AIC picker. *Journal of Applied Geophysics*, 150, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.012>
- Shang, X., Wang, Y., & Miao, R. (2022). Acoustic emission source location from P-wave arrival time corrected data and virtual field optimization method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163(June 2021), 108129. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108129>
- Siracusano, G., Lamonaca, F., Tomasello, R., Garescì, F., Corte, A. La, Carnì, D. L., Carpentieri, M., Grimaldi, D., & Finocchio, G. (2016). A framework for the damage evaluation of acoustic emission signals through Hilbert-Huang transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75(871), 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.12.004>
- Smith, J., & Abel, J. (1987). The spherical interpolation method of source localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 12.
- St-Onge, A. (2011). Akaike information criterion applied to detecting first arrival times on microseismic data. *Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 81st Annual Meeting 2011, SEG 2011, Figure 1*, 1658–1662.
- Suhendi, C., Sudibyoy, M. R. P., Erlangga, I. F., & Arbad, A. P. (2019). Automatic Event Identification from Tectonic Earthquakes with Modified Akaike Information Criterion (mAIC). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 258(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012037>
- Toma, R. N., Kim, C. H., & Kim, J. M. (2021). Bearing fault classification using

- ensemble empirical mode decomposition and convolutional neural network. *Electronics (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/electronics10111248>
- Venkateswaran, C., Ramachandran, M., Ramu, K., Prasanth, V., & Mathivanan, G. (2022). Application of Simulated Annealing in Various Field. *Materials and Its Characterization*, 1(1). <https://doi.org/10.46632/mc/1/1/1>
- Wang, T., Zhang, M., Yu, Q., & Zhang, H. (2012). Comparing the applications of EMD and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal. *Journal of Applied Geophysics*, 83, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.05.002>
- Wéber, Z. (2000). Seismic traveltime tomography: A simulated annealing approach. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 119(1–2), 149–159. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00157-0)
- Zhang, J. L., & Sheng, G. Q. (2020). First arrival picking of microseismic signals based on nested U-Net and Wasserstein Generative Adversarial Network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195(February), 107527. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107527>
- Zhang, J., Peng, W., Liu, F., Zhang, H., & Li, Z. (2016). Monitoring Rock Failure Processes Using the Hilbert–Huang Transform of Acoustic Emission Signals. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(2), 427–442. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0755-5>
- Zhou, Zilong, Lan, R., Rui, Y., Dong, L., & Cai, X. (2021). A new algebraic solution for acoustic emission source localization without premeasuring wave velocity. *Sensors (Switzerland)*, 21(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s21020459>
- Zhou, Zilong, Rui, Y., Zhou, J., Dong, L., & Cai, X. (2018). Locating an Acoustic Emission Source in Multilayered Media Based on the Refraction Path Method. *IEEE Access*, 6, 25090–25099. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2805384>
- Zhou, Zixian, Cui, Z., Yin, S., & Kundu, T. (2022). A rapid acoustic source localization technique for early warning of building material damage. *Construction and Building Materials*, 325(February), 126840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126840>
- Zitto, M.E., Sassano, M.P., Muszkats, J.P., Filipussi, D.A., R. Piotrkowski, R. (2020). Evaluación de daño en roca andesita mediante energía y entropía de la descomposición EMD y wavelet en señales de emisión acústica. *Actas de Trabajos Completos Del E-GLEA 10: Décimo Encuentro Del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (Pp. 262-272)*.

# LOCALIZACIÓN 3D DE EVENTOS DE EMISIÓN ACÚSTICA EN ROCAS TIPO BASALTO APLICANDO EL ALGORITMO SIMULATED ANNEALING

Alejandra Vesga-Ramírez <sup>ab</sup>, M. Eduardo Zitto <sup>c</sup>, Dino Filipussi <sup>ad</sup>, Emilio Camilion <sup>e</sup>, Rosa Piotrkowski <sup>cf</sup>, Martín Gómez <sup>ab</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Ondas Elásticas, ICES, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, ARGENTINA

<sup>b</sup> Grupo de Emisión Acústica, FRD, Universidad Tecnológica Nacional, ARGENTINA

<sup>c</sup> Departamento de Matemática, FIUBA, Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA

<sup>d</sup> Departamento de Física, ECyT-UNSAM, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA  
<sup>e</sup> YPF-Tecnología, La Plata, ARGENTINA

<sup>f</sup> ITECA UNSAM-CONICET, Centro de Matemática Aplicada, ECyT-UNSAM, Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA

e-mail: [alejandravesga@cnea.gov.ar](mailto:alejandravesga@cnea.gov.ar)

## RESUMEN

La Emisión Acústica (EA) es un fenómeno en el cual un material sujeto a tensión, libera energía en forma de ondas elásticas. Estas ondas son producidas por un mecanismo, denominado fuente de EA, activado al recibir alguna clase de energía. La localización de eventos de EA en estructuras rocosas puede proveer la base para determinar áreas potenciales de inestabilidad como efecto de la reactivación de fracturas/fallas, propagación de fracturas y nucleación de microfracturas. Por tanto, localizar con precisión eventos de EA es de gran importancia para investigar el mecanismo de falla de rocas. En este trabajo, se presentan los resultados de la localización 3D de EA basado en el Algoritmo Simulated Annealing (SA) sobre muestras de roca tipo basalto. SA es un algoritmo de optimización aleatorio y global que busca minimizar el error. El algoritmo se implementó a partir del registro de los tiempos de arribo de las ondas P de las señales de EA y del análisis de las velocidades de propagación de esas ondas en distintas direcciones. Como excitación se utilizó una fuente localizada tipo Hsu-Nilsen y se midieron las ondas elásticas con 6 sensores de EA adecuadamente distribuidos sobre la superficie de la roca. Para evitar los efectos del ruido o de eventos espurios que dificultan la identificación del arribo de la onda P, se utilizó una novedosa técnica que aplica el criterio de información Akaike (AIC) sobre los modos obtenidos mediante la Descomposición Empírica en Modos en Conjuntos (EEMD). Los resultados de la localización 3D con el SA fueron comparados con las posiciones reales de las fuentes y la precisión alcanzada fue del 5%. La mayor fuente de error provino de la velocidad de propagación de la onda P debido a la heterogeneidad y anisotropía de la muestra.

*Palabras Clave:* Emisión acústica, Localización de fuentes, Simulated Annealing, AIC-EEMD.

## INTRODUCCIÓN

La emisión acústica (EA) está definida como un fenómeno en el cual se generan ondas elásticas debido a la rápida liberación de energía cuando un material está sujeto a tensión (Ono, 2014; Shang et al., 2022). Estas fuentes de EA están asociadas a la deformación mecánica y fracturas en el material, cambios de fase, corrosión, fricción y procesos magnéticos (Grosse, C. U., 2021; Hesser et al., 2021). Localizar estas fuentes de Emisión Acústica (EA) se ha convertido en uno de los métodos de ensayos no destructivos más importantes para investigar el mecanismo de fractura de rocas y predecir zonas

potenciales de daño (Calabrese & Proverbio, 2020; Harnett et al., 2018; Hu & Dong, 2020; Siracusano et al., 2016; Zilong Zhou et al., 2021).

En general la EA se mide colocando un sensor sobre la superficie del objeto a estudiar, que permite convertir las ondas mecánicas en señales eléctricas que luego serán procesadas y analizadas. La localización de la EA se puede abordar en forma análoga a como se hace en sismología, es decir, cuando ocurre un terremoto, estas ondas se propagan y con estaciones sismológicas que procesen estas señales se puede localizar el epicentro e hipocentro del terremoto. Esta misma metodología es aplicada a las fuentes de EA, los sensores de EA son el análogo a las estaciones sismológicas y los tiempos observados son los tiempos de arribo de la onda P a cada sensor (Boniface et al., 2020; Zixian Zhou et al., 2022). La precisión de la localización es influenciada por dos factores, la velocidad de propagación de la onda P y el tiempo de arribo de la onda P. Además las señales de EA a menudo están mezcladas con ruidos de alta frecuencia, los cuales podrían reducir la precisión de la identificación de la onda P (Hu & Dong, 2020; Shang et al., 2018; Zilong Zhou et al., 2021).

El presente trabajo describe un método de optimización para obtener la mejor localización para fuentes de EA a partir del registro de los tiempos de arribo de las ondas P de las señales de EA y del análisis de las velocidades de propagación de esas ondas en distintas direcciones. Algunos trabajos anteriores han considerado este problema inverso utilizando un enfoque bayesiano ((Jones et al., 2022)) o métodos tradicionales como Geiger, Inglaterra, triangulación, Simplex ((Ge, 2003; Prugger & Gendzwill, 1988; Salinas et al., 2010; Smith, J., & Abel, 1987; Zilong Zhou et al., 2018)). Sin embargo, estos métodos de inversión local son dependientes de la solución inicial de partida y la velocidad promedio y a menudo no llega a la respuesta óptima, atrapados en mínimos locales. En este trabajo, utilizamos un método de inversión de optimización global basado en el algoritmo Simulated Annealing (SA), aplicando el criterio de Metrópolis, para obtener el óptimo global para cada fuente de EA. El nombre de este algoritmo, inspirado en el recocido de metales en metalurgia, fue propuesto en 1983 por S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt Jr. y M. P. Vecchi cuando resolvieron el problema del viajante de comercio aplicando este esquema de optimización (S. Kirkpatrick; et al, 1983). El algoritmo de inversión SA tiene algunas ventajas sobre otros enfoques basados en métodos de inversión local. Es computacionalmente eficiente, puede resolver problemas lineales y no lineales, problemas inversos indeterminados y puede implementar más fácilmente información compleja a priori (Otubamowo., 2012; Venkateswaran et al., 2022). Para evitar los efectos del ruido o de eventos espurios que dificultan la identificación del arribo de la onda P, se utilizó una novedosa técnica que aplica el criterio de información Akaike (AIC) sobre los modos obtenidos mediante la aplicación a la señal de EA la Descomposición Empírica en Modos en Conjuntos (EEMD).

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **Definición tiempo de arribo**

La distancia entre una fuente de EA y un sensor puede calcularse así:



$$D_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (\text{Ec.1})$$

El tiempo de arribo de la fuente de EA al sensor  $x_i$  esta dado por la ecuación

$$t_i = \frac{\sqrt{[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2]}}{V} + t_0 \quad (\text{Ec.2})$$

Donde  $x_0, y_0, z_0$  son las coordenadas del evento de EA,  $t_0$  es el tiempo de origen del evento de EA y  $x_i, y_i, z_i$  son las coordenadas del sensor de EA  $i$  y  $V$  es la velocidad de la onda P en el medio.

Utilizando la técnica de diferencia de tiempos de arribo (TDOA, por sus siglas en inglés), todos los tiempos son considerados relativos al primer hit registrado. Si  $t_1$  es el primer tiempo de arribo de la onda P registrado en un sensor (S1) respecto a todos los sensores, este tiempo se puede estimar como:

$$t_1 = \frac{\sqrt{[(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2]}}{V} \quad (\text{Ec.3})$$

donde  $x_1, y_1, z_1$  son las coordenadas del sensor que registró el tiempo de arribo más rápido, y  $x_0, y_0, z_0$  son las coordenadas de la fuente de EA. De esta forma se puede definir  $\Delta t_i$  como la diferencia en tiempos entre este sensor (S1) y cualquier sensor  $S_i$  como:

$$\Delta t_i = t_i - t_1 \quad (\text{Ec.4})$$

Reemplazando la Ec. 3 en la Ec. 4 se tiene:

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} - \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2}}{V} \quad (\text{Ec.5})$$

A partir de los tiempos arribo de la onda P registrados por cada uno de sensores de EA para cada fuente de EA, la ecuación (4) calcula la diferencia de tiempos observados,  $\Delta t_{i,obs}$  y para un determinado set de coordenadas  $x_0, y_0, z_0$  la ecuación (5) permite estimar los tiempos simulados  $\Delta t_{i,sim}$ .

### Algoritmo Simulated Annealing (ASA)

El propósito de utilizar el algoritmo Simulated Annealing es minimizar la diferencia entre los  $\Delta t$  observados y  $\Delta t$  simulados. Una forma de medir esta diferencia es encontrar el mínimo de la función de costo  $E$ , definida como la suma de las diferencias entre los tiempos observados y simulados en todos los sensores para cada evento de EA:

$$E = \sum (\Delta t_{i,obs} - \Delta t_{i,sim})^2 \quad (\text{Ec.6})$$

Esta función de costo también es llamada la norma L2. La función E en el caso de localización de fuentes de EA es dependiente de las coordenadas de la fuente  $x_0, y_0, z_0$ . Para cada fuente potencial de localización de EA esta suma es recalculada.

En la Fig. 1 se presenta el pseudo-código para la localización de EA utilizando el algoritmo de inversión geofísica SA. La idea del algoritmo es replicar el recocido de un metal que es calentado a una temperatura física inicial  $T$  y luego enfriado muy lentamente hasta alcanzar el estado mínimo de Energía cuando se forma un cristal perfecto. La temperatura es tratada en el algoritmo como un parámetro de evolución y el estado mínimo de Energía es el mínimo de la función de costo  $E(m)$  (diferencia entre los tiempos medidos y calculados) donde  $m$  es el vector solución.

```

Inicia con localizacion random  $m_0$  con Energia de
 $E(m_0) = [t_{obs} - t_{sim}(m_0)]$ 
Loop sobre Temperatura (T)
  ▪ Loop sobre un número random de
    movimientos/Temperatura
  ▪ ▪ Calcula  $E(m_1)$  para un nuevo modelo  $m_1$ 
  ▪ ▪ if  $\Delta E \leq 0$ , entonces
  ▪ ▪ ▪  $m_0 = m_1$ 
  ▪ ▪ ▪  $E(m_0) = E(m_1)$ 
  ▪ ▪ end if
  ▪ ▪ if  $\Delta E \geq 0$ , entonces
  ▪ ▪ ▪ escoja un número random  $r = [0,1]$ 
  ▪ ▪ ▪ si  $P = e^{\frac{-\Delta E}{T}} > r$  entonces
  ▪ ▪ ▪ ▪  $m_0 = m_1$ 
  ▪ ▪ ▪ ▪  $E(m_0) = E(m_1)$ 
  ▪ ▪ end if
  ▪ end if
  ▪ end Loop
End Loop

```

**Figura 1.** Pseudocódigo del algoritmo Simulated Annealing para localización de EA

Los datos de entrada del algoritmo son los tiempos de arribo de la onda P a cada sensor y las coordenadas de localización  $x_i, y_i, z_i$  de cada uno de los sensores. El algoritmo inicia con una primera solución aleatoria  $m_0 = x_0, y_0, z_0$  cuya función de costo/Energía es  $E(m_0) = [t_{obs} - t_{sim}(m_0)]$ . Luego, una pequeña perturbación es realizada a  $m_0 = m_0 + \Delta m$  para obtener una nueva solución  $m_1 = x_0, y_0, z_0$  con energía  $E(m_1)$ . Si  $\Delta E$  es la diferencia de energía entre los dos estados, es decir:

$$\Delta E = E(m_1) - E(m_0), \quad (\text{Ec.7})$$

Una nueva solución es aceptada o no en función del delta E. Si  $\Delta E \leq 0$ , la nueva solución siempre es aceptada. Sin embargo, si  $\Delta E \geq 0$ , entonces la nueva solución es aceptada con la probabilidad:

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right), \quad (\text{Ec.8})$$

donde  $T$  es la temperatura. La regla de aceptación anterior (Ec. 8) es conocida como el criterio Metrópolis (Métropolis et al., 1953). En el contexto de nuestro problema de optimización, el algoritmo comienza en un estado de alta temperatura inicial donde se aceptan las localizaciones "malas" en el sistema con una mayor probabilidad, y se "enfriá" lentamente en cada barrido hasta que el estado alcanza la temperatura especificada más baja. Inicialmente, con valores grandes para  $T$ , frecuentemente se aceptan soluciones con un mayor valor de función de error (esto permite escapar de mínimos locales); a medida que el valor de  $T$  disminuye, tal tipo de soluciones raramente se aceptan, y cuando  $T$  se acerca a cero, solo se aceptan aquellas soluciones que mejoran la anterior. Si en el proceso de inversión se usa el anterior criterio y se repite un gran número de veces en cada temperatura, se puede demostrar que el equilibrio termal puede ser alcanzado, en nuestro caso la mejor localización de la fuente de EA en función de los tiempos de arribo observados. Si la temperatura se baja lentamente siguiendo un esquema de enfriamiento adecuado, entonces en el límite cuando la temperatura se aproxima a cero se podrá alcanzar la mejor solución para nuestro problema.

Para evitar los efectos del ruido o de eventos espurios que dificultan la identificación del arribo de la onda  $P$ , se utilizó una novedosa técnica que aplica el criterio de información Akaike (AIC) sobre los modos obtenidos mediante la Descomposición Empírica en Modos por Conjuntos (EEMD- Ensemble empirical mode decomposition). A continuación, se presenta en detalle los fundamentos teóricos que soportan estos dos métodos propuestos.

### **Descomposición Empírica en Modos por Conjuntos (EEMD)**

La descomposición empírica en Modos (EMD, del inglés Empirical Mode Decomposition) es un método adaptativo para el análisis de señales no lineales y no estacionarias (Huang et al., 1998; Zitto. & et al, 2020). Este método descompone cualquier señal completa en varias funciones intrínsecas de modos denominadas IMF por sus siglas en inglés y una porción residual (Toma et al., 2021). Una señal debe satisfacer dos condiciones para ser considerada una IMF, 1) la cantidad de puntos extremos (máximos y mínimos) y la cantidad de cruces por cero deben ser iguales o diferir a lo sumo en uno y 2) la media local, definida como el valor medio de las envolventes superior e inferior, debe ser nula para todo punto (Colominas et al., 2011).

El método basado en EMD ha sido satisfactoriamente aplicado para el análisis de señales derivadas del fracturamiento de rocas en años recientes (Flynn, J. W., 2014; Siracusano et al., 2016; Zitto. & et al, 2020). Sin embargo, aunque la señal resultante obtenida después de realizar EMD incluye la mayor parte de la información relevante de la señal temporal sin procesar, algunas veces se experimentan problemas de presencia de oscilaciones de amplitud muy dispar en uno o más modos o de mezcla de modos, es decir una parte de la IMF puede tener oscilaciones comunes a las de los modos adyacentes (Toma et al., 2021). Para solucionar los problemas anteriormente descritos, en el método Descomposición Empírica en Modos por Conjuntos (EEMD) primero se obtienen varias realizaciones de la señal sumándole ruido blanco, luego a cada una de las realizaciones se calculan los modos mediante el método EMD y finalmente se promedian los resultados

para obtener los modos finales de la señal (Gu & Peng, 2021). Esto ha mejorado el desempeño del análisis de las señales en diferentes campos de aplicación (Liu, G., 2021; Wang et al., 2012; J. Zhang et al., 2016).

Los pasos básicos del método de EEMD son:

Paso 1: Añadir varias veces ruido blanco  $y_i(t)$  a la serie temporal original, el cual tiene una distribución normal como se muestra en la Ec. 9.

$$x_i(t) = x(t) + y_i(t) \quad (\text{Ec.9})$$

Paso 2: Después de añadir ruido blanco, la serie temporal se descompone mediante el método EMD extrayendo todas las IMFs denotadas como  $c_{ij}(t)$ , y una componente residual denotada como  $r_i(t)$ , donde  $c_{ij}(t)$  representa la  $j$ -ésima IMF obtenida después que el ruido blanco es añadido por la  $i$ -ésima vez, como se muestra en la Ec. 10.

$$x_i(t) = \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) + r_i(t) \quad (\text{Ec.10})$$

Paso 3: Repetir paso 1 y 2 para cada realización con ruido blanco.

Paso 4: Los resultados anteriores se promedian para obtener las IMF finales por EEMD, como se muestra en la Ec 11.

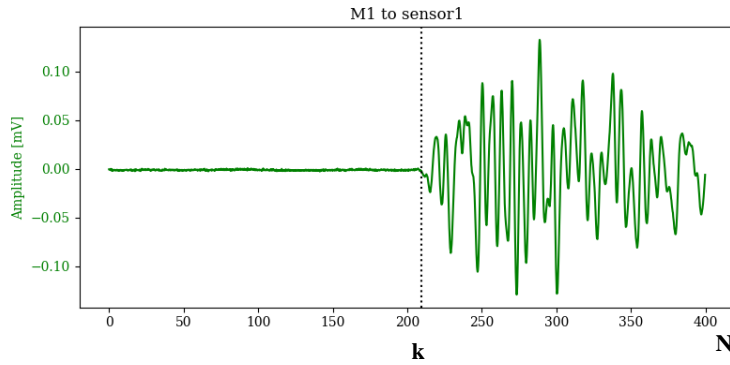
$$c_j(t) = \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) \quad (\text{Ec.11})$$

donde,  $c_j(t)$  representa el  $j$  – ésimo valor de IMF descompuesto por EEMD ( $j=1, \dots, N$ )

### **Criterio de Información Akaike (AIC)**

El Criterio de Información Akaike (AIC, del inglés Akaike Information Criterio) fue desarrollado en 1973 por (Akaike, 1973) para estudiar el desempeño de un modelo de ajuste estadístico para un proceso autorregresivo. En estadística y procesamiento de señales, un modelo autorregresivo (AR) es una representación de un proceso aleatorio, en el que la variable de interés depende de sus observaciones pasadas. Específicamente, la variable de interés o de salida, depende linealmente de sus valores anteriores. La ventaja de este criterio es que puede eficientemente clasificar eventos de la misma serie de tiempo.

El criterio AIC asume que el intervalo antes y después de la onda P son dos series de tiempo estacionarias. Un proceso estacionario tiene una media, varianza y autocorrelación que no cambia en el tiempo. La primera serie de tiempo es ruido aleatorio y la segunda serie registra una variación de energía en un cierto intervalo, ver Fig. 2.



**Figura 2.** Una muestra de la señal de un evento de EA a partir de la rotura de una mina de lápiz. El punto de separación  $k$  delimita las dos series de tiempo adyacentes con diferentes propiedades estadísticas.

El criterio AIC en la muestra  $k$  para una serie de tiempo  $x(t)$  de longitud  $N$  esta expresado como:

$$AIC(k) = (k - M)\log(\sigma^2_{1,max}) + (N - M - k)\log(\sigma^2_{2,max}) + C \quad (11)$$

donde  $M$  es el orden de un proceso AR para ajustar los datos, y  $\sigma^2_{1,max}$  y  $\sigma^2_{2,max}$  son las varianzas en los intervalos de series de tiempo (de  $t_{1 a k}$  y  $t_{k+1 a N}$ ) y  $C$  es una constante. A efectos de obtener los valores de AIC, el valor para  $M$  y los coeficientes AR deben ser estimados. Esto puede ser computacionalmente costoso. Sin embargo, si  $M$  es pequeño comparado con el número de muestras, la ecuación 12 puede ser simplificada así:

$$AIC(k) = (k \cdot \log\{var(x[1:k])\}) + (N - k - 1)(\log\{var(x[k + 1, N])\}) \quad (12)$$

donde  $var(x[1:k])$  es la varianza de la serie de tiempos  $x(t_1), x(t_2), \dots, x(k)$ , y  $var(x[k + 1, N])$  es la varianza de la serie de tiempo  $x(k+1), x(k+2), \dots, x(N)$ . El tiempo de arribo de la onda P es el punto donde AIC tiene un valor mínimo. El algoritmo AIC es robusto en presencia de ruido con alta amplitud, computacionalmente rápido, y puede ser implementado automáticamente (Cavanaugh, 2019; St-Onge, 2011; Suhendi et al., 2019; J. L. Zhang & Sheng, 2020). Para señales de microsismica/EA donde la onda P es claramente identificable, el AIC es muy útil. Sin embargo, cuando no lo es, el AIC produce grandes errores. Por esta razón es necesario aplicar el AIC en análisis multiescala para reducir el efecto del ruido.

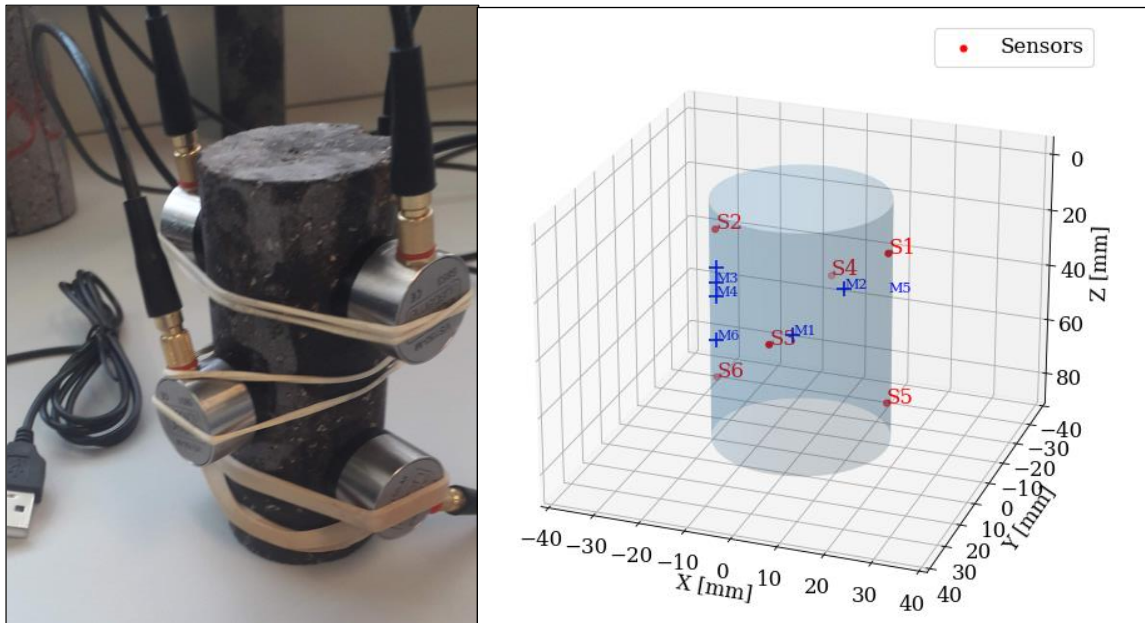
## DESARROLLO EXPERIMENTAL

El ensayo se realizó sobre una probeta de roca tipo basalto del volcán Peteroa (Argentina) con dimensiones de 89.94 mm de largo y diámetro de 37.93 mm. Seis (6) sensores de emisión acústica fueron acondicionados para este ensayo, ver Fig. 3. Las coordenadas de los sensores de EA se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Coordenadas de localización de los receptores de emisión acústica

Descripción	x [mm]	y[mm]	z[mm]
Sensor 1 (S1)	19	0	15
Sensor 2 (S2)	-19	0	15
Sensor 3 (S3)	0	19	39
Sensor 4 (S4)	0	-19	39
Sensor 5 (S5)	19	0	68
Sensor 6 (S6)	-19	0	68

Se utilizó un Equipo de detección de EA marca Ytasca. Los sensores de EA son tipo VS150-M de Vallen Systeme. Su respuesta de frecuencia se caracteriza por un pico a 150 kHz donde exhibe una resonancia. Las señales de EA fueron amplificadas con un amplificador de 40dB, filtradas por un filtro pasa bajo de 20kHz y un filtro pasa alto de 400kHz. Una frecuencia de 2000 muestras por segundo fue usada. El umbral de detección fue fijado en un valor de 40 dB basado en el ruido ambiental.



**Figura 3.** A la izquierda la localización de los sensores en la probeta de roca y a la derecha la posición de las diferentes fuentes de EA simbolizadas con una cruz azul.

Seis (6) fuentes de EA fueron generadas en la superficie de la probeta mediante la ruptura de la mina de un lápiz, las coordenadas se presentan en la tabla 2. El tamaño de la mina de lápiz HB es de 0,5 mm y fue rota a 30 ° con respecto a la superficie de la probeta.

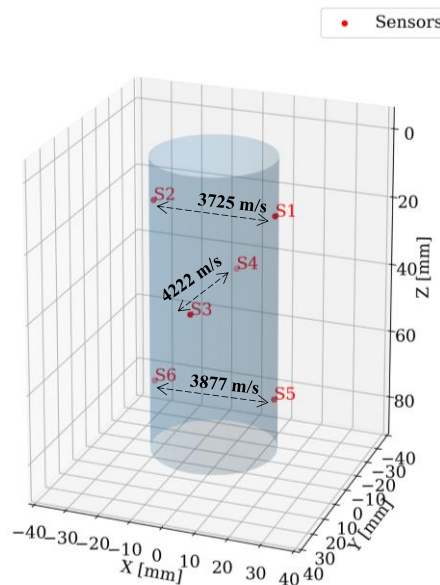
**Tabla 2.** Coordenadas de localización de las fuentes de emisión acústica por ruptura de la mina de lápiz.

Fuente EA	x [mm]	y[mm]	z[mm]
Fuente 1 (M1)	25	30	15
Fuente 2 (M2)	5	30	15
Fuente 3 (M3)	25	30	15

Fuente EA	x [mm]	y[mm]	z[mm]
Fuente 4 (M4)	5	30	15
Fuente 5 (M5)	15	0	25
Fuente 6 (M6)	15	0	5

*Estimación de velocidad de propagación onda P en roca*

Las mediciones de la velocidad de la onda P fueron realizadas usando un Pulser/Receptor el cual está incorporado en cada sensor de EA con voltajes preamplificados a 40 dB. Cada sensor emitió un pulso, se calculó la velocidad de la onda P hasta el sensor de enfrente a partir de la distancia previamente conocida, ver Fig. 4. La velocidad promedio varió desde 3725 m/s hasta 4223 m/s, mostrando que existe anisotropía en la muestra de roca basalto. Estas velocidades fueron incorporadas al algoritmo, el cual seleccionaba para cada fuente de EA la mejor velocidad promedio final de la onda P para alcanzar el menor error a la solución.



**Figura 4.** Velocidades estimadas de la onda P en diferentes direcciones en la muestra.

*Criterio AIC-EEMD para la identificación de onda P*

Automatizamos la identificación del arribo de la onda P haciendo uso de la combinación de dos técnicas: descomposición empírica en modos por Conjuntos (EEMD) y el criterio de información Akaike (AIC). Primero para cada señal recibida en cada sensor se le realizó la descomposición empírica de modos por conjuntos (EEMD) y se obtuvieron las IMF.

Luego se aplicó el criterio AIC sobre cada una de las IMF y se identificó el tiempo de arribo de la onda P. Posteriormente se compararon los tiempos de arribo de la onda P con el criterio AIC-EEMD respecto al tiempo de arribo identificado manualmente en la señal original (sin aplicar las EEMD) y se seleccionaron las IMF que mejor retienen el comportamiento de la onda P.

### *Aplicación algoritmo de localización Simulated Annealing*

Luego se realizó la localización de las fuentes de EA utilizando el algoritmo SA. Los datos de entrada son el tiempo de arribo de la onda P a cada uno de los sensores identificado con picking manual y con el criterio AIC-EEMD en las IMF seleccionadas, así como las coordenadas  $x, y, z$  de cada sensor de EA. El algoritmo SA necesita dos parámetros de evolución para iniciar, la  $T_{inicial}$  y el esquema de “enfriamiento” o descenso de la temperatura.

Para seleccionar la temperatura inicial utilizamos el esquema estadístico discutido en (Wéber, 2000), el cual puede escribirse como:

$$T_{inicial} \geq \sqrt{E(m_0, T)^2 - (\overline{E(m_0, T)})^2}, \quad (13)$$

donde  $\overline{E(m_0, T)^2}$  representa el promedio del cuadrado de la función de costo para diferentes temperaturas y  $m_0$  soluciones, mientras que  $(\overline{E(m_0, T)})^2$  representa el cuadrado del promedio de la función de costo para diferentes temperaturas y  $m_0$  soluciones. De acuerdo con este esquema la temperatura inicial seleccionada fue de 0.000027.

Para el descenso de la temperatura se tomó el siguiente esquema:

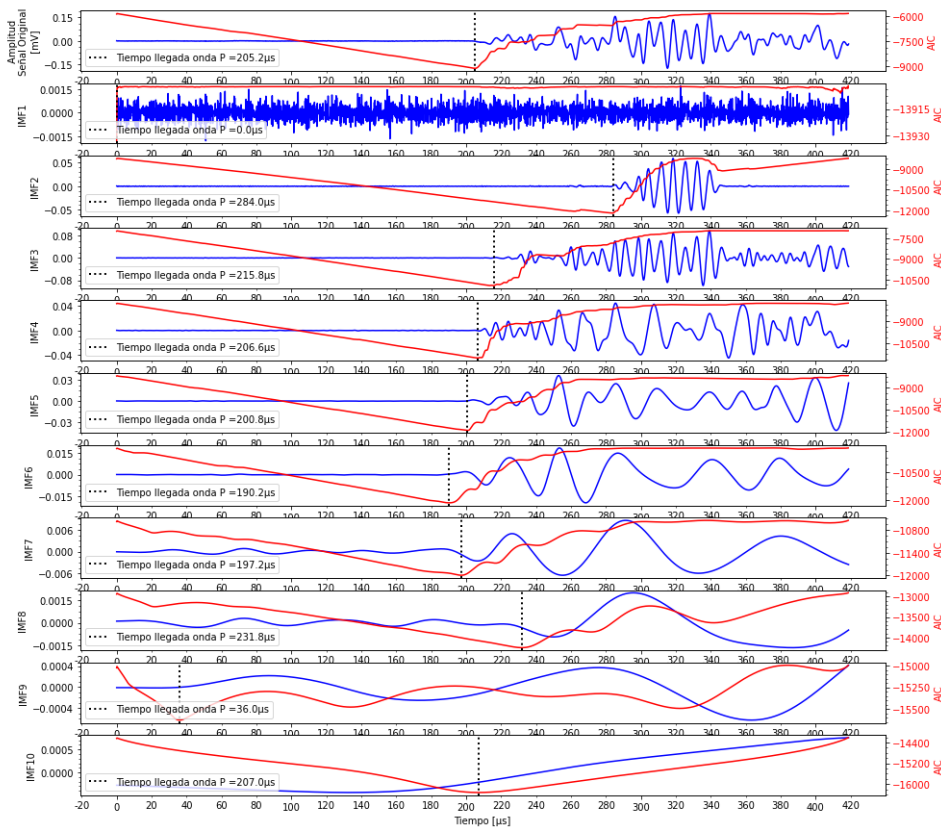
$$T_{k+1} = 0.99 T_k, \quad (14)$$

este esquema garantiza que la temperatura descienda lentamente, además ha sido utilizado exitosamente en otras implementaciones de SA (Khairuddin & Zainuddin, 2019; Mahdi et al., 2017; Peprah et al., 2017).

## **RESULTADOS**

Para cada señal recibida por la activación de las fuentes de EA se obtuvieron en promedio 10 IMF, luego se aplicó el criterio AIC-EEMD y se calcularon los tiempos de arribo de la onda P, ver Fig. 5.

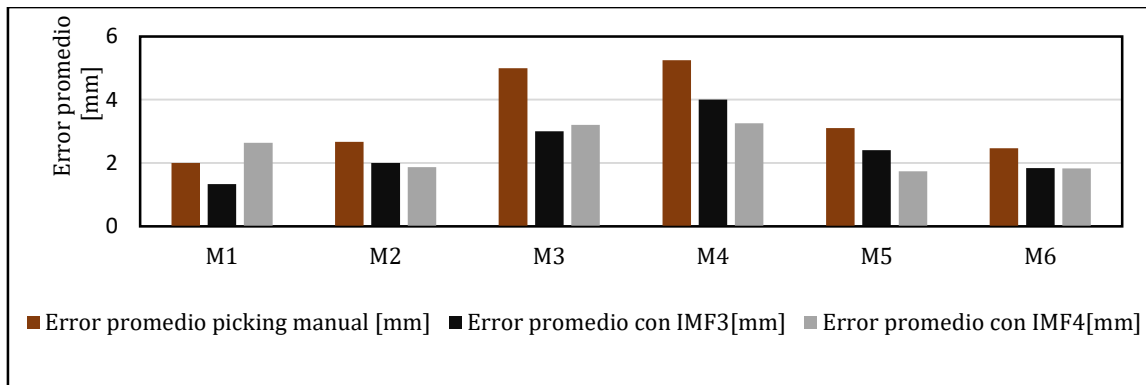




**Figura 5.** Ejemplo de la aplicación del Criterio AIC-EEMD para la identificación del tiempo de llegada de la onda P en la señal recibida en el sensor 1 de la primera fuente de EA M1. La línea azul representa la Descomposición empírica de modos por conjuntos (EEMD) para la señal recibida y la línea roja representa la serie de tiempo AIC. La línea negra punteada representa el tiempo de arribo de la onda P con el criterio AIC-EEMD

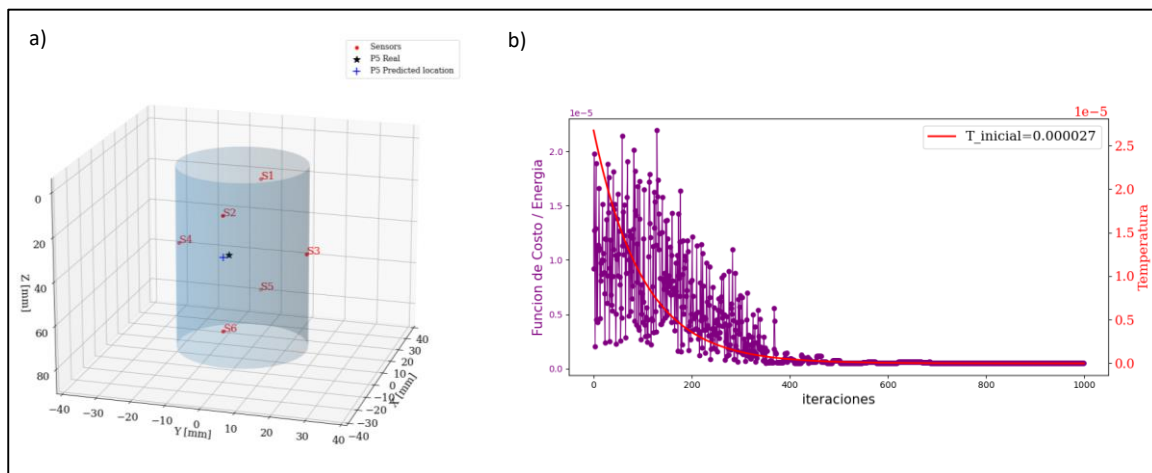
El EEMD posee la habilidad de separar las componentes de alta frecuencia y baja frecuencia. Se observó que las IMF1 e IMF2 corresponden a componentes de altas frecuencias que son muy ruidosas, algunas asociadas a la frecuencia natural del sensor que podrían producir un falso tiempo de llegada de onda P. Por otro lado, las IMF6 a IMF10 corresponden a frecuencias muy bajas en las cuales no se puede identificar claramente la llegada de la onda P. Por tanto, las IMF discutidas anteriormente no deben ser tomadas en cuenta para identificar el tiempo de arribo de la onda P, ver más detalles en el trabajo de (Vesga-Ramírez et al, 2022).

En orden de seleccionar las IMF en las que mejor se identifica el arribo de la onda P, se compararon los tiempos estimados con el criterio AIC-EEMD en las IMF 3, IMF4 e IMF5 con respecto al picking manual. La IMF 3 e IMF4 tienen el menor residual en comparación con el tiempo estimado manualmente. Luego se estimó la precisión de localización de las fuentes de EA con base al tiempo de arribo de la onda P estimado manualmente y el tiempo de arribo estimado por el criterio AIC-EEMD en las IMF3, IMF4. En todos los casos el error de localización fue menor con el criterio AIC-EEMD que con respecto al picking manual.



**Figura 6.** Error Localización para fuentes de EA (M1 a M6) considerando el tiempo de onda P estimado con el criterio AIC-EEMD en IMF3 e IMF4 vs la localización considerando el tiempo de la onda P manualmente en la señal completa.

En la Fig. 7 se muestra un ejemplo de la evolución del proceso de optimización de la localización 3D para una de las fuentes de EA. Se muestra el descenso de la función de costo, así como la temperatura en el algoritmo SA hasta llegar a la mejor solución. Se observa que el algoritmo inicia con una temperatura de  $T=0.000027$ , continua con un “enfriamiento” implementado como  $T_{k+1} = 0.99 T_k$ , y obtiene finalmente la mejor posición  $X, Y, Z$  para la fuente a una temperatura  $T \rightarrow 0$ . La línea morada representa la variación estocástica de las soluciones con su respectiva función de costo/Energía.



**Fig 7 a)** Esquema 3D de la localización obtenida con el algoritmo SA para la fuente de EA M5. Se muestra en negro la posición real de la fuente y en cruz azul la localización con el algoritmo SA. **b)** Minimización de la función de costo de la localización de la fuente de EA, así como el descenso de la temperatura hasta alcanzar la mejor solución.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo describe en detalle el algoritmo Simulated Annealing (SA) para localización 3D de fuentes de EA sobre muestras de roca tipo basalto. El algoritmo SA se diferencia de los otros métodos de optimización global porque es semiguaiado. Usa un criterio de aceptación adicional, que permite no descartar algunos conjuntos de parámetros. Esto permite salir más rápido de un mínimo local y descartarlo como solución final. Los resultados de la localización de las fuentes de EA fueron comparados con las posiciones reales de las fuentes. El error promedio máximo fue de 4 cm. La mayor fuente de error provino de la velocidad de propagación de la onda P debido a la heterogeneidad y anisotropía de la muestra.

Para evitar los efectos del ruido o de eventos espurios que dificultan la identificación del arribo de la onda P, se utilizó una novedosa técnica que aplica el criterio de información Akaike (AIC) sobre los modos obtenidos mediante la Descomposición Empírica en Modos en Ensamblados (EEMD). Los resultados preliminares de la evaluación del tiempo de arribo de las ondas P muestran que el criterio de identificación con el método AIC-EEMD tiene mayor precisión con respecto al de picking manual. Esto se debe a que al filtrar los modos de más alta frecuencia se logra eliminar el ruido que enmascara el arribo de la onda P en la señal de EA completa. Las IMF que mejor representan la onda P son las IMF3 e IMF4.

## REFERENCIAS

- A.P., A., K., O., & T.O., E. (2012). A Comparative Study of Simulated Annealing and Genetic Algorithm for Solving the Travelling Salesman Problem. *International Journal of Applied Information Systems*, 4(4), 6–12. <https://doi.org/10.5120/ijais12-450678>
- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *2nd International Symposium on Information Theory*, 267–281.
- Boniface, A., Saliba, J., Sbartaï, Z. M., Ranaivomanana, N., & Balayssac, J. P. (2020). Evaluation of the acoustic emission 3D localisation accuracy for the mechanical damage monitoring in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 223(October 2019), 106742. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106742>
- 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), 1–33. <https://doi.org/10.3390/cmd2010001>
- Cavanaugh, J. E. (2019). The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*.
- Colominas, M. A., Flandrin, P., & Torres, E. (2011). *Descomposicion empirica en modos por conjuntos completa con ruido adaptativo y aplicaciones biomedicas*.
- Flynn, J. W., et al. (2014). Empirical Mode Decomposition Analysis of Continuous Acoustic Emission (AE) Data from Laboratory Rock Deformation Experiments.

- Ge, M. (2003). Analysis of source location algorithms, Part II: Iterative methods. *Journal of Acoustic Emission*, 21, 29–51.  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ANALYSIS+OF+SOURCE+LOCATION+ALGORITHMS+Part+II+:+Iterative+methods#0>
- Grosse, C. U., et al. (2021). Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Engineering. In *Springer Nature*.
- Gu, J., & Peng, Y. (2021). An improved complementary ensemble empirical mode decomposition method and its application in rolling bearing fault diagnosis. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 113, 103050.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103050>
- Harnett, C. E., Benson, P. M., Rowley, P., & Fazio, M. (2018). Fracture and damage localization in volcanic edifice rocks from El Hierro, Stromboli and Tenerife. *Scientific Reports*, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20442-w>
- Hesser, D. F., Mostafavi, S., Kocur, G. K., & Markert, B. (2021). Identification of acoustic emission sources for structural health monitoring applications based on convolutional neural networks and deep transfer learning. *Neurocomputing*, 453, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.04.108>
- Hu, Q., & Dong, L. (2020). Acoustic Emission Source Location and Experimental Verification for Two-Dimensional Irregular Complex Structure. *IEEE Sensors Journal*, 20(5), 2679–2691. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2954200>
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Snin, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
- Jones, M. R., Rogers, T. J., Worden, K., & Cross, E. J. (2022). A Bayesian methodology for localising acoustic emission sources in complex structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163(May 2021), 108143.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108143>
- Khairuddin, R., & Zainuddin, Z. M. (2019). A Comparison of Simulated Annealing Cooling Strategies for Redesigning a Warehouse Network Problem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1366(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1366/1/012078>
- Liu, G., et al. (2021). Precise detection of early breast tumor using a novel EEMD-based feature extraction approach by UWB microwave. *Medical & Biological Engineering & Computing*.
- Mahdi, W., Medjahed, S. A., & Ouali, M. (2017). Performance analysis of simulated annealing cooling schedules in the context of dense image matching. *Computacion y Sistemas*, 21(3), 493–501. <https://doi.org/10.13053/CyS-21-3-2553>
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). “Equation of State Calculations by Fast Computing Machines” and “Monte Carlo Simulation of Equilibrium Ensembles”. *Journal of Chemical Physics*, 21, 1087–1092.

- Ono, K. (2014). Acoustic Emission BT - Springer Handbook of Acoustics. *Springer Handbook of Acoustics*, 1209–1229. [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-0755-7\\_30](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-0755-7_30)[https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7\\_30](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_30)
- Peprah, A. K., Appiah, S. K., & Amponsah, S. K. (2017). An Optimal Cooling Schedule Using a Simulated Annealing Based Approach. *Applied Mathematics*, 08(08), 1195–1210. <https://doi.org/10.4236/am.2017.88090>
- Prugger, A. F., & Gendzwil, D. J. (1988). Microearthquake location: a nonlinear approach that makes use of a simplex stepping procedure. *Bulletin - Seismological Society of America*, 78(2), 799–815. <https://doi.org/10.1785/bssa0780020799>
- S. Kirkpatrick; et al. (1983). Optimization: Simulated Annealing. *Optimization for Industrial Problems*, 220(4598), 165–200. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24974-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24974-7_7)
- Salinas, V., Vargas, Y., Ruzzante, J., & Gaete, L. (2010). Localization algorithm for acoustic emission. *Physics Procedia*, 3(1), 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.111>
- Shang, X., Li, X., Morales-Esteban, A., & Dong, L. (2018). Enhancing micro-seismic P-phase arrival picking: EMD-cosine function-based denoising with an application to the AIC picker. *Journal of Applied Geophysics*, 150, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.09.012>
- Shang, X., Wang, Y., & Miao, R. (2022). Acoustic emission source location from P-wave arrival time corrected data and virtual field optimization method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163(June 2021), 108129. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108129>
- Siracusano, G., Lamonaca, F., Tomasello, R., Garescì, F., Corte, A. La, Carnì, D. L., Carpentieri, M., Grimaldi, D., & Finocchio, G. (2016). A framework for the damage evaluation of acoustic emission signals through Hilbert-Huang transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75(871), 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.12.004>
- Smith, J., & Abel, J. (1987). The spherical interpolation method of source localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 12.
- St-Onge, A. (2011). Akaike information criterion applied to detecting first arrival times on microseismic data. *Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 81st Annual Meeting 2011, SEG 2011, Figure 1*, 1658–1662.
- Suhendi, C., Sudibyo, M. R. P., Erlangga, I. F., & Arbad, A. P. (2019). Automatic Event Identification from Tectonic Earthquakes with Modified Akaike Information Criterion (mAIC). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 258(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/258/1/012037>
- Toma, R. N., Kim, C. H., & Kim, J. M. (2021). Bearing fault classification using ensemble empirical mode decomposition and convolutional neural network. *Electronics (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/electronics10111248>
- Venkateswaran, C., Ramachandran, M., Ramu, K., Prasanth, V., & Mathivanan, G. (2022). Application of Simulated Annealing in Various Field. *Materials and Its Characterization*, 1(1). <https://doi.org/10.46632/mc/1/1/1>
- Wang, T., Zhang, M., Yu, Q., & Zhang, H. (2012). Comparing the applications of EMD

- and EEMD on time-frequency analysis of seismic signal. *Journal of Applied Geophysics*, 83, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.05.002>
- Wéber, Z. (2000). Seismic traveltime tomography: A simulated annealing approach. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 119(1–2), 149–159. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(99\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(99)00157-0)
- Zhang, J. L., & Sheng, G. Q. (2020). First arrival picking of microseismic signals based on nested U-Net and Wasserstein Generative Adversarial Network. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195(February), 107527. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107527>
- Zhang, J., Peng, W., Liu, F., Zhang, H., & Li, Z. (2016). Monitoring Rock Failure Processes Using the Hilbert–Huang Transform of Acoustic Emission Signals. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(2), 427–442. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0755-5>
- Zhou, Zilong, Lan, R., Rui, Y., Dong, L., & Cai, X. (2021). A new algebraic solution for acoustic emission source localization without premeasuring wave velocity. *Sensors (Switzerland)*, 21(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s21020459>
- Zhou, Zilong, Rui, Y., Zhou, J., Dong, L., & Cai, X. (2018). Locating an Acoustic Emission Source in Multilayered Media Based on the Refraction Path Method. *IEEE Access*, 6, 25090–25099. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2805384>
- Zhou, Zixian, Cui, Z., Yin, S., & Kundu, T. (2022). A rapid acoustic source localization technique for early warning of building material damage. *Construction and Building Materials*, 325(February), 126840. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126840>
- Zitto, M.E., Sassano, M.P., Muszkats, J.P., Filipussi, D.A., R. Piotrkowski, R. (2020). Evaluación de daño en roca andesita mediante energía y entropía de la descomposición EMD y wavelet en señales de emisión acústica. *Actas de Trabajos Completos Del E-GLEA 10: Décimo Encuentro Del Grupo Latinoamericano de Emisión Acústica (Pp. 262-272)*.
- .

# MONITOR DE CO<sub>2</sub> PARA INDICACIÓN Y CONTROL DE VENTILACIÓN EN AMBIENTES CERRADOS PARA PREVENCIÓN DE COVID-19 Y MEJORA EN EL RENDIMIENTO LABORAL

Vorobioff J.<sup>ab</sup>, Pintos T.<sup>a</sup>, Checozzi F.<sup>ab</sup>, Boggio N.<sup>abcd</sup>, Rinaldi J.<sup>d</sup>, Rinaldi C.<sup>abcd</sup>

<sup>a</sup> Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (Comisión Nacional de Energía Atómica - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Argentina

<sup>b</sup> Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina

<sup>c</sup> CONICET, Argentina

<sup>d</sup> UNSAM, Argentina

e-mail: [vorobioff@cnea.gov.ar](mailto:vorobioff@cnea.gov.ar)

## RESUMEN

Los seres humanos producen y exhalan CO<sub>2</sub>, por lo que en ambientes cerrados sin ventilación aumenta la concentración de este gas. Muchas veces se utiliza la concentración de CO<sub>2</sub> del aire exterior como referencia para medir la tasa de ventilación (Allen, 2016). La concentración típica de CO<sub>2</sub> al aire libre es de aproximadamente 400 ppm, aunque puede llegar a 500 ppm (Persily, 2017). Las concentraciones mayores a 20000 ppm provocan una respiración más profunda, mayores a 100.000 ppm provocan alteraciones visuales y temblores con posible pérdida del conocimiento y más de 250.000 ppm de CO<sub>2</sub> puede causar la muerte (Ostro, 2000). En los edificios sin cambios en la tasa de ventilación, las altas concentraciones de CO<sub>2</sub> tienen efectos perjudiciales en la toma de decisiones y el rendimiento laboral. Con 1000 ppm de CO<sub>2</sub>, el rendimiento se reduce significativamente en seis de las nueve métricas de rendimiento en la toma de decisiones comparado a 600 ppm (Satish, 2012). Con 2500 ppm de CO<sub>2</sub>, el rendimiento se reduce significativamente en siete de las nueve métricas de rendimiento.

En este trabajo se diseñó un monitor de gases portátil, de diseño flexible y de bajo costo. Se utilizan sensores de CO<sub>2</sub> químicos electrolíticos y sensores infrarrojos, con rangos de detección de 350 a 10000 ppm. Los sensores utilizados presentan la ventaja de tener buena sensibilidad y selectividad al CO<sub>2</sub>. El monitor de gases tiene un sistema de calibración simple, por el cual mediante software se ajustan automáticamente los parámetros de la curva de calibración tras circular aire limpio. También se muestra el diseño de un banco de gases utilizado para verificar la calibración de los sensores. Se realizaron varias mediciones, obteniendo resultados satisfactorios. Debido al diseño flexible se propone armar una red de monitores de gases distribuidos estratégicamente en edificios.

Palabras Clave: Sensor, dióxido de carbono, Calibración, COVID-19.

## INTRODUCCIÓN

Estudios científicos recientes indican que existen tres vías posibles de transmisión del virus del COVID-19: contacto con superficies contaminadas, la vía respiratoria y posiblemente la vía fecal oral. Respecto a la vía respiratoria, hay que tener en cuenta la presencia de este virus en las gotas procedentes de estornudos de más de 5 µm que rápidamente caen al suelo, permaneciendo por poco tiempo en el aire. También hay que

tener en cuenta la formación de gotas de menor tamaño, de 0.1 a 0.5  $\mu\text{m}$ , estas son aerosoles que permanecen flotando en el ambiente de espacios cerrados. El virus puede permanecer durante horas en aerosoles y algunos días en superficies. En espacios cerrados, la difusión del virus mediante aerosoles es mayor respecto a los espacios abiertos, teniendo mayores riesgos cuando la ventilación es deficiente. Resulta importante asegurar una ventilación adecuada en espacios interiores. Esta puede ser una ventilación natural o forzada (realizada con sistemas de ventilación/climatización). Algunas recomendaciones especifican que la renovación mínima del aire debe ser de 30  $\text{m}^3$  de aire limpio por hora y trabajador. Sin embargo, por temas de salud tampoco se recomiendan corrientes de aire con velocidades mayores a 0,25 m/s para trabajos en ambientes no calurosos.

La concentración de  $\text{CO}_2$  resulta un buen indicador de la ventilación. El nivel de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es de aprox. 450 ppm, tomándose este valor como referencia. En cambio, la concentración en el aire exhalado por las personas es del orden de 40 mil ppm. Entonces, una medición de 850 ppm significa que el 1% del aire de una habitación fue exhalado por una persona. Esto es un indicador de la probabilidad de contagio  $P$ , que es función del tiempo de permanencia de las personas y su exposición al aire contaminado por otros, ver Ec. (1).

$$P = 1 - e^{(-\int_0^T \sigma(n) f \frac{I}{n} q dt)} \quad (1)$$

Donde  $T$  es el tiempo de exposición,  $n$  es el número de personas en un espacio,  $I$  es la cantidad de personas infectadas,  $\sigma(n)$  es 1 si  $n > 0$ , sino 0,  $q$  es una unidad de infección o un valor determinado en función de la actividad y personas específicas. La variable  $f$  (ver Ec. 2) es la fracción de aire que volvió a respirarse, estimada en base a la concentración de  $\text{CO}_2$  medida  $C$ , la concentración exhalada  $C_a$  y la concentración en ambientes abiertos  $C_0$ .

$$f = \frac{C - C_0}{C_a} \quad (2)$$

Diferentes organizaciones recomiendan un umbral máximo de 800 ppm. La Agencia Ejecutiva para Salud y Seguridad de Gran Bretaña en su guía para Ventilación y acondicionamiento del aire durante la pandemia del Coronavirus recomienda que “Mediciones de  $\text{CO}_2$  deberían ser usadas como una guía amplia para la ventilación en el interior de un espacio en vez de tratarlos como umbrales seguros. Niveles exteriores alrededor de 400ppm e interiores con un valor de  $\text{CO}_2$  consistente menor a 800ppm es probable que indique que un espacio esté bien ventilado”. De forma similar, el Ministerio de Salud Argentino dice que “Una estrategia para evaluar de manera indirecta el grado de estanqueidad del aire interior es el monitoreo de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono). Se recomienda aumentar la apertura de puertas y ventanas cuando el nivel de  $\text{CO}_2$  supere las 700 ppm (partes por millón de masa de aire).”.

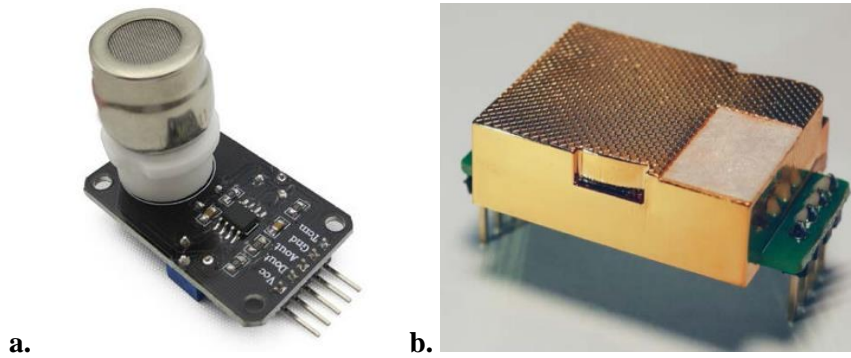
## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se diseña y se construye un monitor de gases portátil, pequeño, de bajo costo y flexible. Se utilizan sensores de gas químicos electrolíticos modelo MG811 y sensores infrarrojos modelo MH-Z19C, ambos marca Winsen, ver Fig. 1. Para el sensor electrolítico, en presencia de altas concentraciones de  $\text{CO}_2$ , se genera una reacción en



los electrodos positivos y negativos de la batería del sensor, y se genera una fuerza electromotriz entre el electrodo sensible y la referencia. Se mide la señal de voltaje de salida para determinar la concentración de dióxido de carbono, con rangos de detección 350 a 10000 ppm (CO<sub>2</sub>). Los sensores utilizados presentan la ventaja de tener buena sensibilidad y selectividad al CO<sub>2</sub>, baja dependencia a la humedad y temperatura, buena estabilidad y repetibilidad, y bajo costo.

El sensor infrarrojo de gas de dióxido de carbono MH-Z19C es un sensor de uso general que utiliza el principio de infrarrojos no dispersos (NDIR) para detectar la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire. Tiene buena selectividad, compensación de temperatura y larga vida útil. Se pueden obtener las mediciones a través de una salida serie, una analógica o una modulación de ancho de pulso (PWM) , todas trabajan en forma simultánea. Combina una tecnología confiable de detección de gas por absorción infrarroja con un bajo costo y tamaño reducido.



**Figura 1. a. Sensor MG811 b. MH-Z19C**

El monitor de gases utiliza los sensores mencionados, presenta un sistema de calibración simple donde por medio de una micro bomba circula aire ambiente limpio o aire sintético para fijar la referencia. Mediante software se ajustan automáticamente los parámetros de la curva de calibración para mostrar resultados de concentración en ppm. Se efectúan mediciones en un ambiente ventilado sin personas y luego en presencia de personas sin ventilación. A su vez se dispone de un banco de gases para calibrar los sensores, que genera mezclas de CO<sub>2</sub> con aire puro en concentraciones y flujos controlados.

El monitor de gases indica los resultados obtenidos en un display LCD y/o en el software de la computadora. También en forma opcional se puede agregar transmisión inalámbrica para ver los resultados en un celular. El monitor posee además una señal de alarma que indica la necesidad de ventilar los ambientes.

#### Calibración del sensor MG811

Para el sensor MG811 se calcula la concentración mediante la siguiente fórmula:

$$c = d^{(a-v)/b} \quad (3)$$

Donde:

*c* – concentración de CO<sub>2</sub> en ppm

$d$  – constante de cálculo igual a 400

$v$  – tensión de lectura del sensor en milivolts

$a$  – parámetro variable que se ajusta en la calibración (inicialmente 1500)

$b$  - constante de cálculo igual a 600

Para calibrar el sensor electrolítico, se calcula el valor de  $a$  usando la siguiente fórmula:

$$a = v + b \frac{\ln c_1}{\ln d} \quad (4)$$

Donde  $c_1$  es el valor real de concentración. Por ejemplo, para una habitación bien ventilada será 400ppm. En la práctica se toma  $d = c_1$ , y en ese caso la fórmula de ajuste será:

$$a = v + b \quad (5)$$

Si se decide cambiar  $c_1$  entonces deberíamos cambiar las constantes  $b$  y  $d$  usando las fórmulas:

$$d = c_1 \quad (6)$$

$$b = 100 \ln c_1 \quad (7)$$

En la Fig. 2 se muestra el monitor de gases para el sensor MG811 donde se observa la cámara de calibración. Una vez calibrados los sensores se retira la cámara.



**Figura 2.** Monitor de gases con cámara de calibración

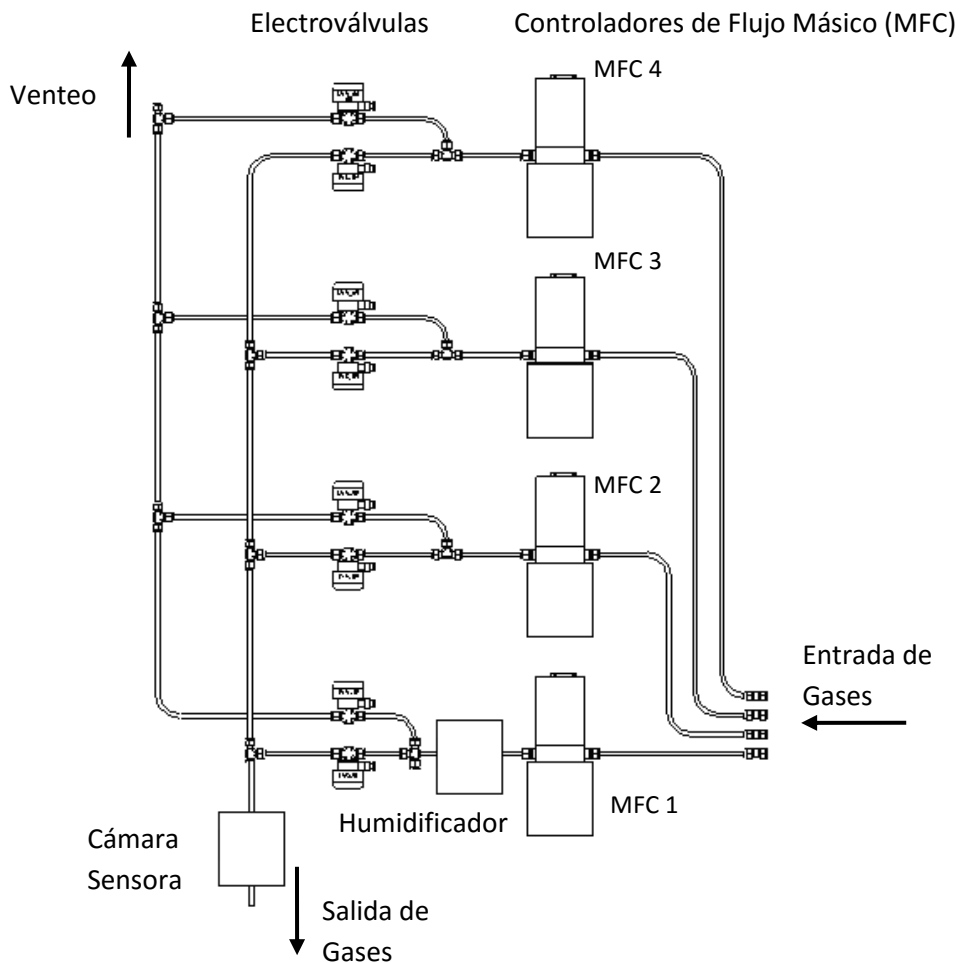
### Banco de gases

Se utiliza un banco de gases para calibrar los sensores. Este banco permite producir diferentes mezclas controladas de gases; las mismas se hacen llegar a una cámara de sensores donde están alojados los sensores. El sistema controla precisamente las cantidades de diferentes especies gaseosas que conforman una mezcla en una cámara de medición. El control de la mezcla gaseosa se realiza mediante una computadora conectada a un dispositivo de control del hardware. El hardware del banco de gases contiene la línea de gases, 4 caudalímetros de flujo másico (conocidos como Mass Flow Controllers o MFC), electroválvulas, humidificador y un controlador que proporciona

una mezcla de gases con caudal, humedad y concentraciones controladas. Se utilizan tubos de aire puro (99,999%) y tubos de CO<sub>2</sub> (2000ppm) de Indura S.A. Argentina.

La línea de gases es capaz de proporcionar mezclas de gases a humedad controlada en el rango de concentración deseado. El proceso de mezcla es logrado con gran precisión gracias a la utilización de los MFC que permiten regular con precisión el caudal másico de un gas. Una vez obtenida la mezcla deseada, esta se lleva a la cámara de medición donde están alojados los sensores. La línea de gases posee 4 líneas de ingreso de gases conectadas a tubos de gas a alta presión (ver Fig. 3). Las líneas 1 y 2 están conectadas ambas a un tubo de aire sintético mientras que la línea 3 y 4 están conectadas a los gases de interés. Los MFC mediante una señal de voltaje de control ajustada convenientemente, permite el paso de un determinado caudal del gas correspondiente a la línea que controla. Se trabaja con controladores de flujo másico de 500 cm<sup>3</sup>/min en las líneas 1, 2 y 3 y con uno de 100 cm<sup>3</sup>/min en la línea 2.

El banco de gases permite garantizar tanto la pureza de las mezclas gaseosas que se introducen en la cámara, controlar el caudal y controlar la concentración del contaminante con el que se desea trabajar.



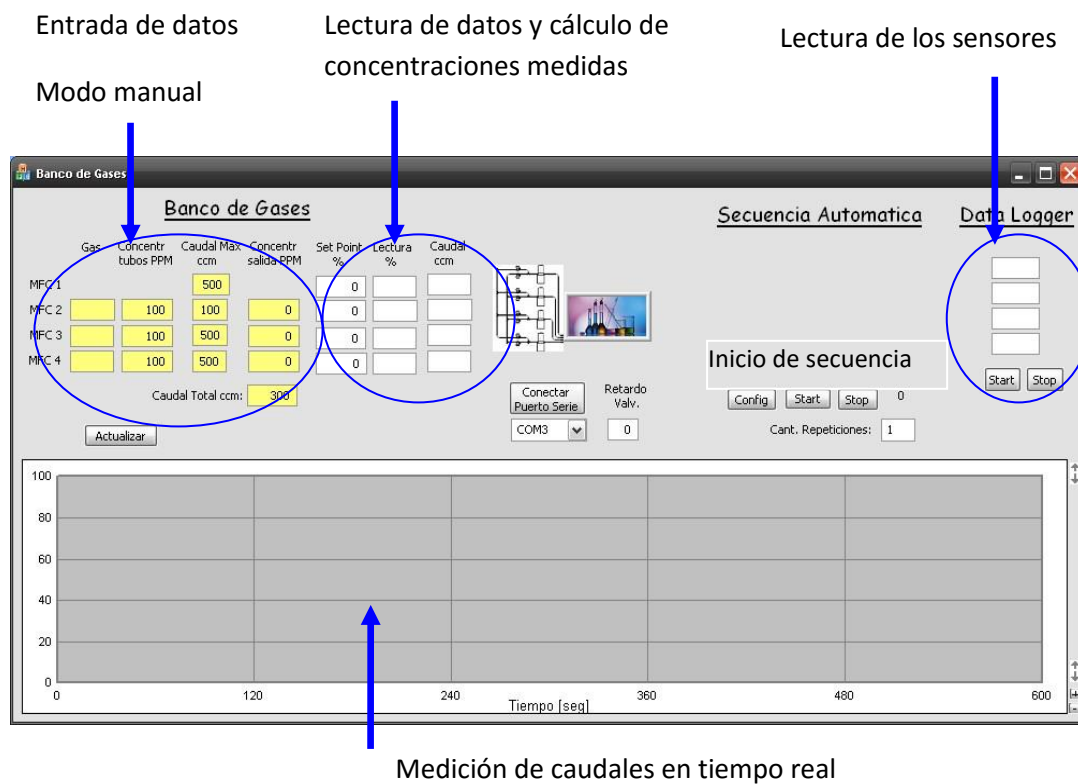
**Figura 3.** Esquema simplificado de la línea de gases

El ensayo se puede llevar a cabo de modo manual o automático, para lo cual se ha implementado un sistema de control, medición y adquisición de datos. Para controlar el caudal de las líneas de gases se utilizan 4 caudalímetros de flujo másico (MFC), marca MKS Instrumentes, modelo 1179A01352CS1BV con rangos máximos de 500 cm<sup>3</sup>/min y de 100 cm<sup>3</sup>/min. Estos MFC ajustan el caudal deseado y también miden el caudal que circula. Para controlar y leer los 4 MFC, se utiliza un controlador de MFC, marca Aalborg, modelo SDPROC Versión 1.03. Este controlador se conecta a una PC mediante un conversor USB a RS-232, para transmitir datos y ejecutar comandos.

Se implementa un software de diseño propio que envía comandos al controlador de MFC, registra los caudales de cada línea de gases y controla el cierre y la apertura de las electroválvulas. Los algoritmos implementados calculan los caudales de cada MFC.

Se automatizan los procesos de mezcla de gases implementando secuencias de medición. Estas secuencias están formadas por intervalos de tiempo con distintas mezclas gaseosas. La lectura de los caudales de gas se realiza con el software del banco de gases y se grafica en tiempo real. La lectura de los sensores de gas se realiza con el software del monitor de gases y, opcionalmente, se puede realizar con el software del banco de gases.

En la Fig. 4 se muestra la pantalla principal del software del banco de gases, se ingresan el caudal total, las concentraciones de salida deseadas, las concentraciones de cada gas que ingresa al banco de gases, los tiempos de cada secuencia y la cantidad de repeticiones de la secuencia.



**Figura 4.** Pantalla principal del software del banco de gases

Los puntos de trabajo (set point) de los caudalímetros se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$SP(i) = \frac{concentr_{out(i)} \cdot CT \cdot 100}{concentr_{tubo(i)} \cdot CM(i)} \quad i = 1,2,3 \quad (8)$$

$$SP(0) = \frac{100}{CM(0)} \cdot \left[ CT - \sum_{i=1}^3 \frac{SP(i)}{100} CM(i) \right] \quad (9)$$

Donde:

*CT*: caudal total ingresado por pantalla

*concentr\_out(i)*: Concentración de salida deseada, ingresada por pantalla para línea de gas *i*

*concentr\_tubo(i)*: Concentración del tubo de gas *i*, ingresado por pantalla

*CM(i)*: caudal máximo del MFC *i* (100 cm<sup>3</sup>/min para *i*=3,4 o 500 cm<sup>3</sup>/min para *i*=1,2)

*SP(i)*: set point que se envía al MFC *i*, en valor porcentual (0 a 100%)

### Cámara de gas

Los sensores utilizados se montaron en cámaras hechas a partir de recipientes de plástico, con mangueras de conexión al banco de gas y al exterior, y selladas para evitar filtraciones de gas (ver Fig. 5). Se procuró elegir recipientes de bajo volumen para no requerir un volumen de gas excesivo para llenar la cámara.



**Figura 5.** Cámara del sensor de gas

### Protocolo de medición

Las mediciones con el sensor MHZ19C se realizaron inyectando aire con concentraciones de dióxido de carbono incrementadas de forma escalonada siguiendo las especificaciones de la Tabla I, primero purgando la cámara con aire equivalente a un entorno ventilado (400ppm) para luego incrementar la contaminación cada cierto período de tiempo hasta el límite del rango de detección del sensor.

Tabla I. Concentraciones inyectadas a la cámara de gas

Concentración de CO <sub>2</sub> deseada [ppm]	Set Point 1 Aire sin CO <sub>2</sub> [%]	Set Point 4 CO <sub>2</sub> (2000ppm) [%]	Tiempo [minutos]
400	16	20	11
800	12	40	11
1200	8	60	11
2000	0	100	11

## RESULTADOS

Se efectuaron mediciones en un ambiente ventilado sin personas y luego en presencia de personas sin ventilación. Se obtuvieron resultados satisfactorios.

En la Fig. 6 se muestran los resultados del fabricante para medición de diferentes gases con el sensor MG811.

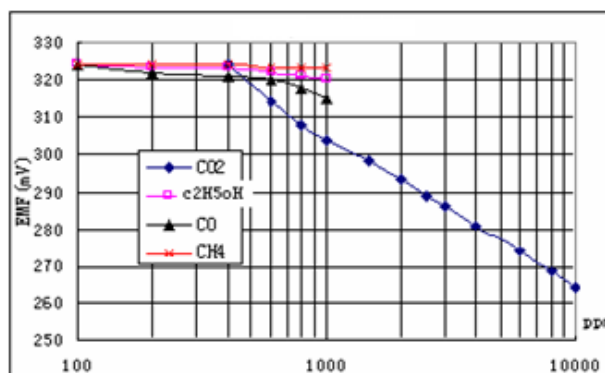
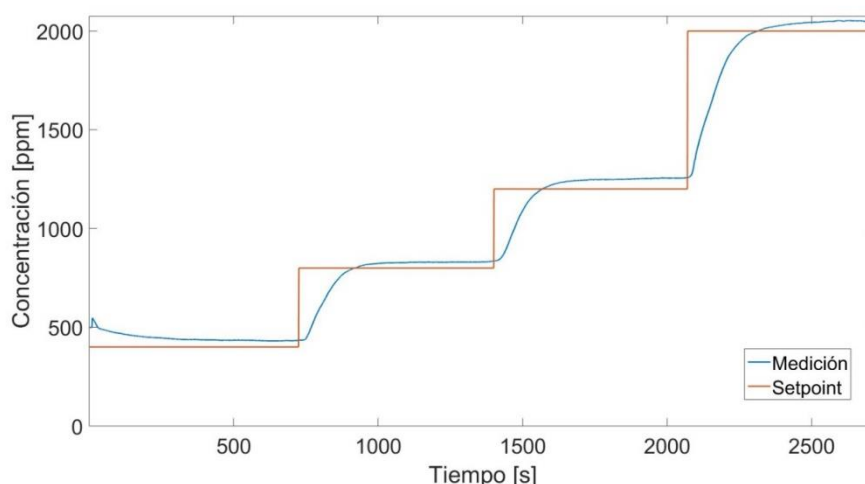


Figura 6. Respuesta del sensor MG811 para diferentes gases

Los resultados de las mediciones realizadas con el sensor MHZ19C pueden verse en la Fig. 7. Puede dividirse la respuesta del sensor en tres etapas: un período inicial hasta que el aire inyectado desplace a la concentración anterior, un tiempo de establecimiento hasta que el sensor responda a la nueva concentración y finalmente un valor estable que es el que se toma para la medición



**Figura 7.** Respuesta del sensor MHZ19C para diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub>

En la Tabla II se pueden observar los valores de medición así como también los tiempos de establecimiento registrados. Los valores medidos son acordes a la precisión específica del sensor ( $\pm 50 \text{ ppm} + 5\%$  del valor de lectura) y el error en régimen estacionario de los controladores de flujo másico del banco de gas (menor al 3%).

Tabla II. Concentración deseada versus medida y tiempo de establecimiento

Concentración deseada [ppm]	Concentración en equilibrio [ppm]	Tiempo de establecimiento [s]
400	430	455
800	830	253
1200	1255	409
2000	2052	552

## CONCLUSIONES

La medición de CO<sub>2</sub> es un buen indicador para analizar los riesgos de contagio de COVID-19 en ambientes cerrados. También resulta importante analizar las concentraciones de este gas para evitar posibles disminuciones en el rendimiento laboral. En este trabajo se diseñó un monitor de gas flexible y de bajo costo para instalar en ambientes cerrados tales como escuelas, oficinas, laboratorios e industrias. Se realiza la calibración de los sensores de gas con un banco de gases para obtener mediciones confiables. Los ensayos experimentales permiten comprobar que los sensores tienen una respuesta satisfactoria para este tipo de aplicación.

## REFERENCIAS

- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health Perspectives*, *124*(6). <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, *120*(12). <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Ostro, B. D., Broadwin, R., & Lipsett, M. J. (2000). Coarse and fine particles and daily mortality in the Coachella Valley, California: A follow-up study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, *10*(5). <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500094>
- Persily, A., & de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*, *27*(5). <https://doi.org/10.1111/ina.12383>



# ANÁLISIS DEL PROCESO DE FALLA DEL HORMIGÓN EMPLEANDO EL MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA Y CRITERIOS DERIVADOS DE LA SISMOLOGÍA

Xargay H.<sup>a,b</sup>, Pepe M.<sup>c,d</sup> y Martinelli E.<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup> Departamento ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), ARGENTINA

<sup>b</sup> Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería (LMNI), Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, INTECIN (UBA-CONICET), ARGENTINA

<sup>c</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, ITALIA

<sup>d</sup> TESIS srl, Fisciano (SA), ITALIA

e-mail: [hernanxargay@cnea.gov.ar](mailto:hernanxargay@cnea.gov.ar)

## RESUMEN

*En este trabajo se estudia la evolución del proceso de falla de vigas de hormigón armado a escala real, ensayadas a flexión en condiciones controladas de laboratorio, hasta alcanzar su capacidad de carga máxima. Durante los ensayos, se registraron continuamente las ondas elásticas de Emisión Acústica emitidas desde sus fuentes en el interior de las muestras. A tal fin, se instalaron varios sensores adheridos a la superficie de las vigas. Para realizar el análisis de las señales adquiridas, se utilizó la analogía entre los eventos de Emisión Acústica y los sísmicos, dando lugar a la implementación de la clásica fórmula de Gutenberg-Richter procedente del campo de la sismología, que relaciona la frecuencia de los eventos con su magnitud. El objetivo de esta propuesta es utilizar el “valor b” de la fórmula de Gutenberg-Richter, habitualmente denominado “b-value” en la literatura, como indicador de daño para la evaluación del estado de integridad de estructuras de hormigón armado en servicio. Para adaptar la teoría del b-value a la Emisión Acústica, se ajustó estadísticamente el criterio dando lugar al “valor b mejorado” (Ib-value). Se presentan y discuten los resultados obtenidos del análisis. Si bien el “valor b mejorado” oscila en su magnitud y es dependiente de la cantidad de eventos agrupados para su cálculo por etapas, exhibe una tendencia decreciente a medida que se crecen las fisuras y, por lo tanto, el daño local en la viga. Valores Ib inferiores a la unidad indican posible fisuración severa. Además, se aprecia que la ubicación de los sensores, en relación a los esfuerzos internos y patrones de fisuración, tiene una incidencia considerable en los resultados.*

*Palabras Clave:* Hormigón, Emisión Acústica, Fisuración, Gutenberg-Richter, Ib-value.

## INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción ha incrementado en las últimas décadas la regulación y el control en el diseño y ejecución de las obras nuevas, en parte debido a que en todo el mundo continúan ocurriendo numerosos y resonantes colapsos estructurales, entre los que se puede citar, el reciente del edificio Champlain Tower en Florida, EEUU (2021), el puente de la Universidad de Florida, EEUU (2018) y el Viaducto Polcevera (también conocido como Puente Morandi) en Génova, Italia (2018). Lo anterior pone en manifiesto que existe una gran necesidad de disponer de técnicas de ensayos no destructivos (END) que permitan evaluar en tiempo real el estado de salud estructural de elementos de hormigón armado (HA) y de otros materiales de la construcción. En las

últimas décadas, se han concebido y aplicado diversos END a estructuras de HA, los cuales son actualizados y perfeccionados continuamente. Entre estos, se ha propuesto el uso del método de Emisión Acústica (EA). Es un hecho conocido que las emisiones acústicas son ondas elásticas transitorias que se propagan en el rango de frecuencias ultrasónicas. Se generan debido a la liberación rápida de energía dentro de un material bajo ciertas condiciones. Así, el END basado en EA consiste en detectar, procesar y analizar las ondas generadas a partir de fuentes localizadas cuando un material o estructura es solicitada convenientemente a diferentes niveles de esfuerzos. Esto permite la monitorización estructural de forma pasiva y no invasiva. En la literatura científica se ha estudiado e implementado el monitoreo de EA para examinar el estado de salud estructural de elementos de HA en pruebas de laboratorio y aplicaciones de campo (Nair and Cai 2010, Vélez et al. 2015, Xargay et al. 2021). Existen diversas técnicas para aplicar la EA con este propósito en HA. Particularmente una de ellas, derivada de conceptos originarios de la sismología, es la que desarrolla en el presente trabajo.

La magnitud de un sismo es la forma histórica de medir el tamaño del mismo. Si bien hoy en día existen diferentes tipos de escalas de magnitud, en general, la misma está relacionada con la máxima amplitud en un sismograma. A partir de datos históricos, en sismología se ha observado que los sismos de pequeña magnitud ocurren con mayor frecuencia que los de gran magnitud (Shearer, 2009). Gutenberg and Richter, 1954 estudiaron este fenómeno y concluyeron que la relación magnitud-frecuencia de los sismos se puede describir con una ley potencial. Como resultado, obtuvieron una fórmula empírica con el siguiente formato:

$$N(\geq M) = 10^{a-bM} \quad (1)$$

$$\log_{10} N = a - bM \quad (2)$$

Donde “N” es el número acumulado de eventos con magnitud mayor o igual “M” en una determinada región y durante un cierto lapso de tiempo, “a” es el número total de sismos y “b” da una idea de la cantidad relativa de sismos de gran magnitud respecto a los de pequeña magnitud. Se ha observado que el valor *b* generalmente cae en el rango de 0,8 a 1,2 en varias regiones y diferentes escalas de magnitud. Para ejemplificarlo, si *b*=1, la cantidad de sismos se incrementa por un factor de 10 por cada unidad que disminuye su magnitud. Fielder, 1974 y Smith, 1981 han observado que el valor *b* disminuye antes de la ocurrencia de un gran sismo. También se apreció que el valor *b* está en relación inversa con la acumulación de tensiones en una región de la corteza terrestre. Posteriormente, algunos investigadores del campo de la ingeniería civil, han propuesto, en base a la analogía entre la EA y los sismos, la aplicación del concepto de la distribución de frecuencias de eventos versus amplitud para el análisis de falla de estructuras de hormigón (Colombo et al., 2003). El argumento se basa en que la EA representa la microsismicidad durante el proceso de fractura del hormigón y que la amplitud de EA está asociada a la escala de la fractura (magnitud). Por lo tanto, el decrecimiento del valor *b* en estructuras de hormigón puede interpretarse como un aumento del nivel de carga aplicado e indicar la cercanía de la rotura (Sagar, 2016). Entonces, el valor *b* sería una herramienta para determinar el estado de salud estructural. Adaptando la Ec. (2) para EA se obtiene:

$$\log_{10} N = a - b \left[ \frac{A_{dB}}{20} \right] \quad (3)$$

Para el cálculo de valor  $b$  se debe definir la cantidad de eventos (denominada “ $\beta$ ”) como muestra o ventana de cálculo. Habitualmente se utilizan los últimos 50 a 100 eventos consecutivos de EA para computar el valor  $b$  en un determinado momento. Cuando se ensayan materiales con comportamiento de falla frágil, el valor  $b$  cae en las etapas iniciales en el rango de 1,5 a 2,5. Luego va decreciendo a medida que se incrementan las tensiones hasta un valor de 1,0 o incluso menores, presentando oscilaciones temporales a medida que se aproxima la rotura (Rao, 1996). Valores altos de  $b$  surgen de una gran cantidad de eventos de EA de pequeña magnitud que predominan por sobre los eventos de gran magnitud, pudiendo revelar procesos dominantes de concentración de tensiones y/o formación de microfisuras; mientras que valores pequeños del valor  $b$  se deben a eventos de gran amplitud e indicarían liberación de tensiones y el predominio del desarrollo rápido e inestable de macrofisuras (Shiotani et al., 2001).

Para adaptar adecuadamente la teoría del valor  $b$  a la EA, dado que surge de la sismología donde se analizan largos períodos temporales de observación con numerosos sismos, se ha propuesto en Shiotani et al., 1994 el “valor  $b$  mejorado” (*Improved b-value* o también *Ib-value*). Los autores notaron que la distribución de amplitudes de EA varía según las condiciones de monitoreo, como lo es la instalación de los sensores, el medio de propagación, el umbral de medición, entre otros. Por lo tanto, el valor  $b$  mejorado fue definido usando criterios estadísticos de la distribución de amplitud para delimitar más adecuadamente el dominio de amplitudes a usar e intentar independizarlo de los efectos anteriores.

$$Ib = \frac{[\log_{10}N(w_1) - \log_{10}N(w_2)]}{(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \sigma} \quad (4)$$

Donde  $N(w_1)$  es el número acumulado de eventos de EA en donde la amplitud es mayor a  $\mu - \alpha_1 \cdot \sigma$  y  $N(w_2)$  es el número acumulado de eventos de EA en donde la amplitud es mayor a  $\mu + \alpha_2 \cdot \sigma$ , siendo  $\sigma$  el desvío estándar y  $\mu$  la media de la distribución de amplitudes del grupo de eventos de EA bajo análisis. Por su parte,  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son constantes experimentales. Se debe notar que para poder comparar el valor  $Ib$  con el valor  $b$  sísmico, el valor  $Ib$  debe ser multiplicado por 20 debido a que  $Ib$  es calculado en escala decibel. Por último, se destaca que el análisis del valor  $Ib$  fue aplicado por numerosos investigadores para analizar materiales como hormigones, suelos y rocas (Rao, 1996, Rao and Prasanna, 2005, Shiotani, 1994, Shiotani, 2001, Proverbio, 2011). En este trabajo se estudia la respuesta estructural y la evolución de EA de vigas de HA sometidas a pruebas de carga hasta alcanzar su máxima capacidad portante. Además, proporciona evidencia experimental sobre el efecto del tipo de procedimiento de carga aplicado y de diversas configuraciones de armaduras en el comportamiento de EA.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se elaboraron en condiciones de laboratorio cuatro vigas de 120 mm (ancho) x 300 mm (altura) x 2400 mm (longitud) con una misma dosificación de hormigón y se las dejó curar durante 3 meses hasta la edad de ensayo. Con el objetivo de obtener diferentes modos de falla, se diseñaron dos esquemas de refuerzos utilizando macrofibras de acero (FF3 Wirand) o barras de acero. Específicamente, dos de las vigas, denominadas "FF", se diseñaron para tener una falla frágil, mientras que se esperaba que las vigas restantes, denominadas "BD", tuvieran una falla dúctil. A las vigas FF se las reforzó únicamente con 60 kg/m<sup>3</sup> de macrofibras de acero de 50 mm de longitud (ver Fig 3.a), que fueron dispersadas en la mezcla de hormigón como un componente adicional. Es decir que las

vigas FF no contaron con las tradicionales barras de refuerzo. Por su parte, el grupo BD tenía 2 barras  $\phi 12$  como refuerzo a tracción y estribos cerrados  $\phi 6$  y separados a 150 mm. Los esquemas de armado se muestran en la Fig. 1. La evaluación mecánica consistió en ensayos de flexión en cuatro puntos. Las cargas se aplicaron en los tercios de las vigas mediante dos actuadores accionados hidráulicamente en el pórtico de cargas del Laboratorio de Materiales y Estructuras de la FI-UBA. La Fig. 2 brinda detalles de la configuración experimental usada en los ensayos y en Fig 3.b se puede apreciar la vista general del pórtico de cargas durante uno de los ensayos. Las vigas fueron sometidas a diversos procesos de carga como se detalla a continuación. Las vigas FF fueron cargadas de manera incremental hasta su fractura. La viga BD1 fue cargada de manera creciente pero intercalando escalones o mesetas de carga constante. Finalmente, la viga BD2 consistió en el caso más complejo: se le aplicó un protocolo de carga cíclico con cinco niveles incrementales de carga hasta alcanzar su máxima capacidad. El incremento de carga entre cada nivel de carga fue un valor constante de  $P=900$  kgf. Además, se llevaron a cabo dos ciclos de carga y descarga por cada nivel, llamados ciclos A y B. La carga máxima en los ciclos B se mantuvo durante 3 minutos para estabilizar la respuesta estructural y detectar las fisuras por inspección visual.

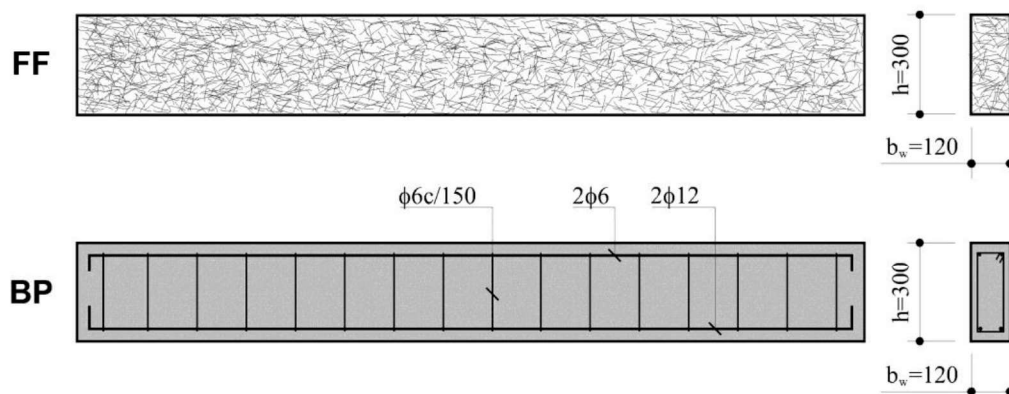


Figura 1. Geometría y esquemas de refuerzo de grupos de vigas.

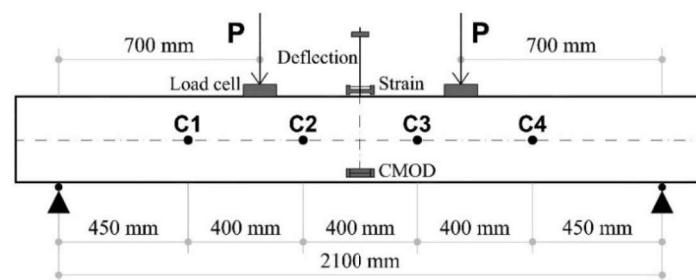
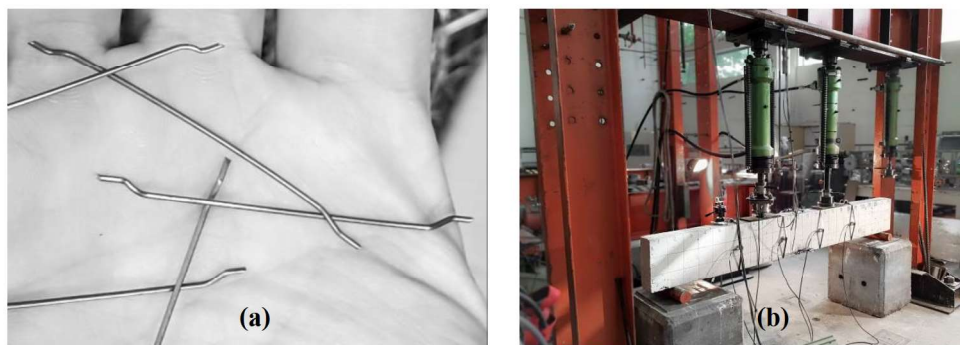


Figura 2. Configuración experimental del ensayo.

Las señales de EA se registraron continuamente durante toda la prueba mecánica. Para ello, se utilizaron dos placas de adquisición PAC PCI-2 y se montaron cuatro sensores con frecuencia de resonancia de 150 kHz en la cara frontal de las vigas. Estos sensores representan canales de EA y se colocaron según se muestra en la Fig. 2 (representados como C1, C2, C3 y C4). En estática y resistencia de materiales, es bien conocido el hecho de que el esquema de cuatro puntos conduce a un diagrama de solicitaciones teórico de flexión pura, es decir, sin esfuerzos de corte en la zona entre los dos puntos de contacto de las cargas, donde se produce un momento flector uniforme y máximo. En

consecuencia, los canales C2 y C3 se ubicaron en el vano central de flexión pura, mientras que los canales C1 y C4 se colocaron en los vanos de corte. Se preestableció en la configuración del equipo un umbral de medición de 40 dB. El valor  $I_b$  fue calculado para cada canal de EA por separado. A tal fin, se programó un código computacional para realizar los cálculos automáticamente en tiempo real a partir de los parámetros de las señales obtenidos del equipo de EA.



**Figura 3. a.** Macrofibras de acero. **b.** Vista del ensayo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Comportamiento estructural*

#### Vigas grupo FF (Fibras-Frágil)

Las vigas FF tuvieron una falla global frágil debido a la formación de una única fisura visible, aunque con diferente localización para cada caso. Las fisuras ocurrieron en torno a  $P=1000$  kgf para ambas vigas ( $P_{\max-FF1}=980$  kgf y  $P_{\max-FF2}=1020$  kgf). A partir de ese momento la capacidad portante fue disminuyendo hasta que se fracturó totalmente cada viga. En el caso de FF1, la fisura se ubicó en el vano central cerca de C2, mientras que en FF2, la fisura se ubicó en el vano de corte cerca de C4. El estado de fisuración final de las vigas FF se presenta en la Fig. 4. En síntesis, después de que ocurrieron las primeras fisuras, en FF1 ocurrió una disminución de la capacidad de carga y luego un segundo pico menor, para finalmente tener un ablandamiento hasta la falla, mientras que FF2 tuvo una caída de capacidad portante más abrupta, sin presentar segundo pico. Las diferencias pueden deberse a la distribución aleatoria de las fibras en el volumen de hormigón durante el mezclado. El efecto de refuerzo de las fibras en la cuantía dosificada de  $60 \text{ kg/m}^3$  no pudo incrementar la capacidad de carga de las vigas posterior a la fisuración de la matriz cementicia, ni redistribuir suficientemente los esfuerzos como para formar múltiples fisuras.

#### Vigas grupo BD (Barras-Dúctil)

Las vigas BD tuvieron una falla global dúctil por flexión, con sus armaduras inferiores alcanzando la fluencia. Las primeras fisuras ocurrieron cerca de los 1000 kgf para ambas muestras (BD1 y BD2), similarmente a las vigas FF. Luego fueron desarrollando un patrón de fisuración que resultó ser bastante análogo en ambas muestras. Por lo tanto, y en aras de la brevedad, sólo se describe el comportamiento de la viga BD2. Durante el progreso del nivel de carga 1 ( $P_1=900$  kgf) no se revelaron fisuras. En el nivel de carga 2 ( $P_2=1800$  kgf) aparecieron las primeras fisuras en el vano central y

desarrollaron una altura considerable, alcanzando  $0,50 \times h$  (altura de la viga). En el nivel de carga 3 ( $P_3=2700$  kgf), aparecieron pocas fisuras nuevas en el tramo central y la mayoría de ellas crecieron hasta  $0,60 \times h$ . Además, se observaron las primeras fisuras de corte ligeramente inclinadas. Durante el nivel de carga 4 ( $P_4=3600$  kgf), se hicieron evidentes nuevas fisuras de corte y las de flexión se propagaron un poco más hasta alcanzar  $0,65 \times h$ . En el nivel de carga 5 ( $P_5=4500$  kgf) se descubrieron nuevas fisuras inclinadas, extensas y cercanas a los apoyos. Las fisuras de flexión existentes se volvieron más anchas y casi no aumentaron en altura (etapa de fisuración estabilizada). Sobrepasando los 4500 kgf, BD2 alcanzó una meseta de fluencia, por lo que no fue posible seguir aumentando la carga y alcanzar el siguiente nivel  $P_6$ . Las pruebas se detuvieron cuando la falla se localizó en el tramo central en algunas fisuras predominantes y la zona superior de hormigón comenzó a fallar por compresión. La carga máxima alcanzada ( $P_{max}$ ) en cada actuador fue para BD1  $P_{max-BD1}=4780$  kgf y para BD2  $P_{max-BD2}=4970$  kgf. Los patrones de fisuración finales de las vigas BD también se muestran en la Fig. 4. En resumen, las vigas B mostraron un proceso de falla dúctil, con un patrón de fisuras evolucionando inicialmente desde la zona central hacia los apoyos (vanos de corte) a medida que se incrementaba la carga aplicada. La Fig. 4 se complementa con la Fig. 5, donde se detallan las fisuras de algunas vigas.

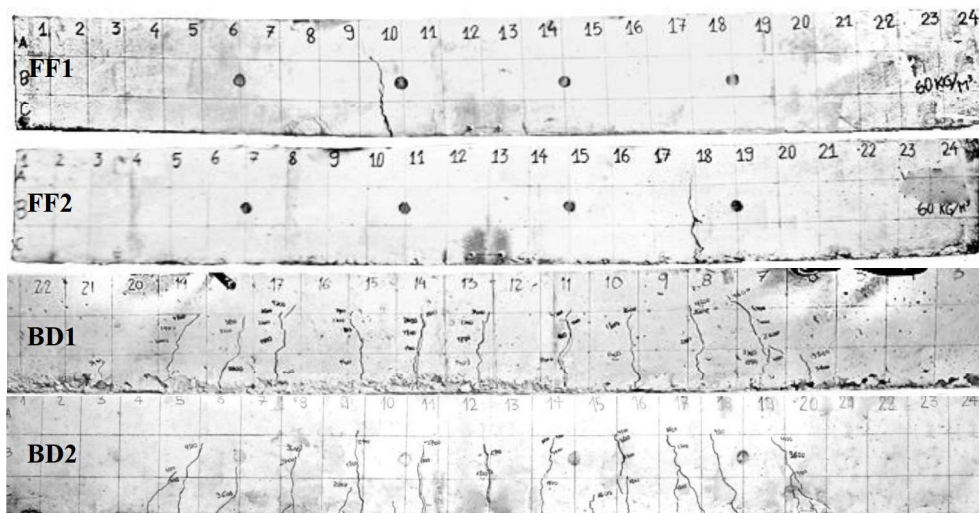


Figura 4. Estado de fisuración final de las vigas.



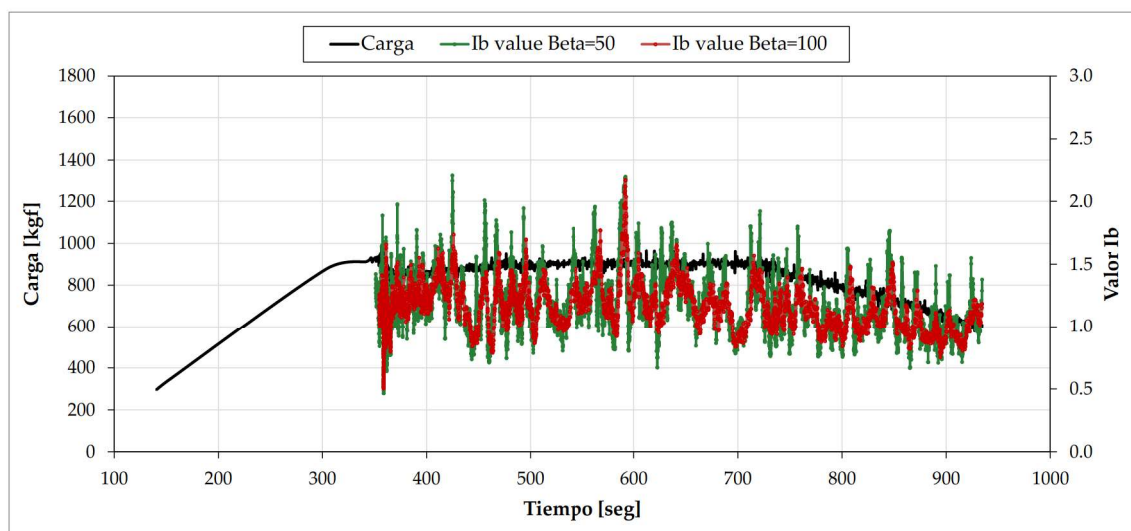
Figura 5. Detalles de fisuras en las vigas FF1, FF2 y BD2.

## Resultados de Emisión Acústica

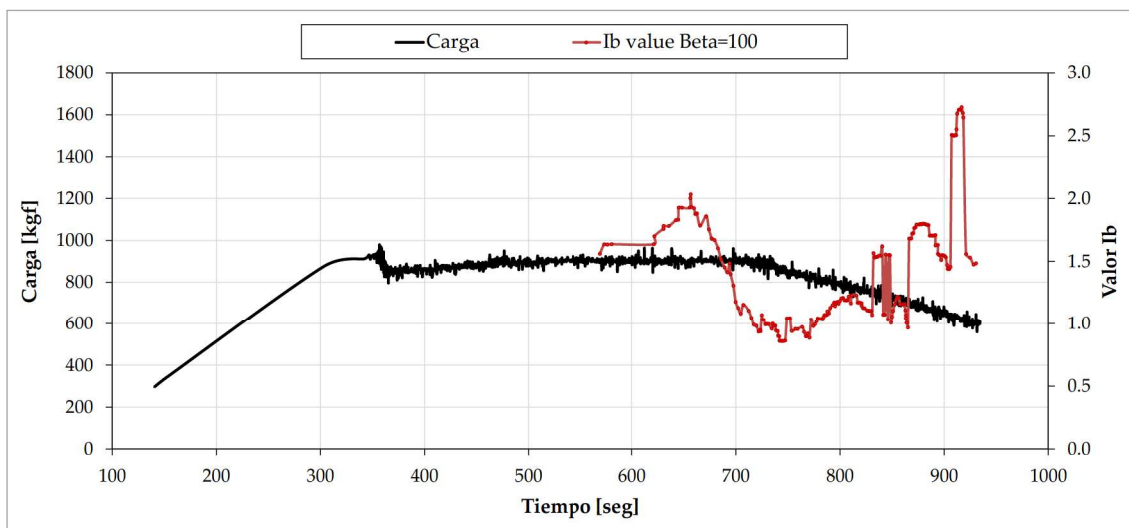
En esta sección se analizan los resultados del valor  $Ib$  derivado de la EA. En todos los casos se lo graficó en función del tiempo transcurrido de ensayo. También se representa la carga aplicada (en línea negra continua) dado que resulta de gran interés correlacionar la evolución del valor  $Ib$  con el nivel de carga. En algunos casos, se muestra también la distribución de amplitudes de las señales de EA que se utilizaron para el cálculo del valor  $Ib$ . Inicialmente, se analizó la sensibilidad a diferentes valores de los parámetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  (0,5, 1,0, 1,5 y 2,0) y  $\beta$  (50, 75, 100 y 250 hits). A medida que se aumenta  $\beta$ , disminuyen los valores extremos de  $Ib$ . A partir de ese análisis preliminar, resultó adecuado adoptar los valores  $\alpha_1=\alpha_2=1$  y  $\beta=100$ .

### Vigas grupo FF

En la Figura 6 se muestra de manera superpuesta la evolución de  $Ib$  calculado con  $\beta=50$  y  $\beta=100$  para el caso de la viga FF1 en el canal 2 (C2, canal más cercano a la fractura, ver Fig. 4). Se aprecia un pico mínimo de  $Ib=0,50$  en correspondencia con la formación de la fisura principal. A su vez, este coincide con la carga máxima del ensayo. Esto se debe a que hasta ese momento la acción resistente era provista básicamente por la matriz cementicia. Al fisurarse, el esfuerzo en la zona traccionada se transfiere al refuerzo que, en este esquema de armado, son las fibras de acero. Los diversos  $Ib$  mínimos posteriores ocurren debido al crecimiento de la fisura en altura y ancho y por el arrancamiento y rotura de las fibras de acero actuando en la zona de fractura. En la Fig. 7 se presenta la evolución de  $Ib$  ( $\beta=100$ ) para el caso de la viga FF1 en el canal 4 (C4, canal más lejano a la fractura). Se destaca que el C4 por la distancia a la fractura no arroja valores relativamente bajos de  $Ib$ , siendo en general por sobre la unidad, teniendo un valle mínimo al finalizar la meseta de carga, justo cuando comienza el ablandamiento del material. Esa transición suele estar asociada al fin del mecanismo resistente de anclaje de los ganchos de las fibras, quedando ya en forma extendida y deslizándose por la matriz de hormigón.

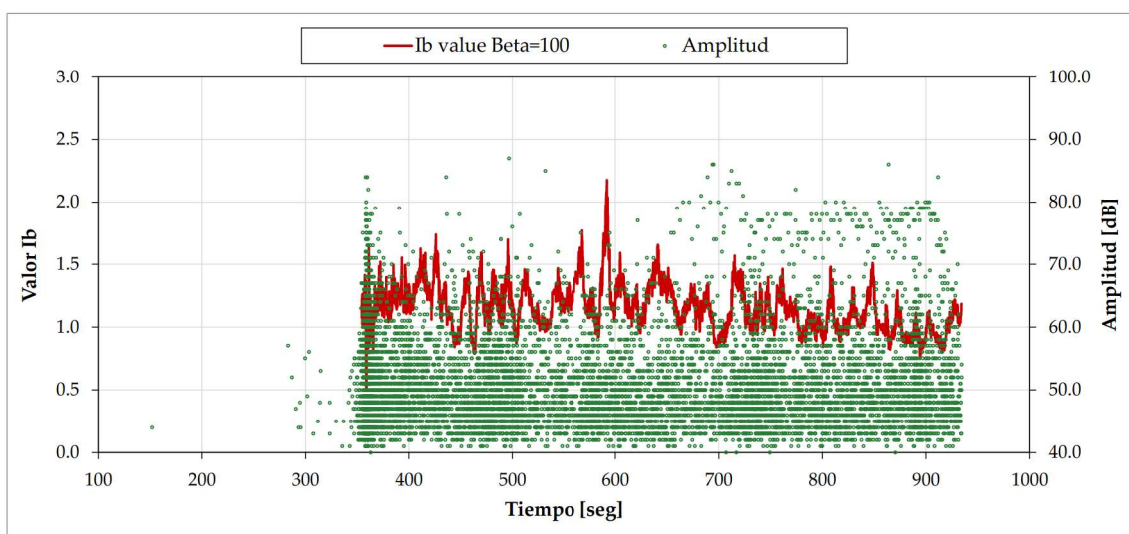


**Figura 6.** Comparación de evolución del valor  $Ib$  en viga FF1 C2 usando  $\beta=50$  y  $\beta=100$  hits (canal más cercano a la fractura).



**Figura 7.** Evolución del valor  $I_b$  en viga FF1 C4 (canal más lejano a la fractura).

En la Fig. 8 se representaron las amplitudes de los eventos de EA detectados por C2 y superpuestas con la curva de  $I_b$  emergente de las mismas. En el comienzo del proceso de carga se detectaron muy baja actividad de EA. Luego, en 358 seg., se observa con claridad el agrupamiento debido a la formación de la fisura principal en coincidencia con el mínimo  $I_b$ . Hacia el final, a partir de los 700 seg. se aprecian eventos de gran amplitud asociados al desprendimiento de las fibras de la matriz de hormigón.



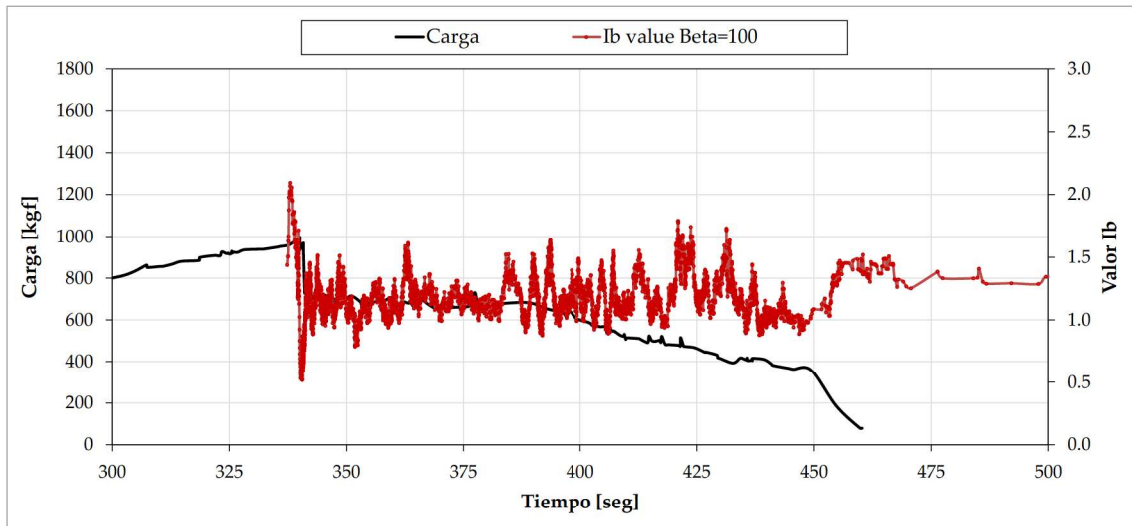
**Figura 8.** Evolución del valor  $I_b$  en viga FF1 C2 en superposición con la amplitud de los eventos de EA.

Los resultados correspondientes a la viga FF2 se encuentran representados en las Fig. 9 y 10, mostrando el valor  $I_b$  obtenido en el canal 4 y en el canal 1, respectivamente. La intención nuevamente es destacar el comportamiento del  $I_b$  según la distancia a la fractura. De acuerdo a la Fig. 4, en FF2 la fisura ocurrió en cercanía del C4 siendo, por su parte, C1 el canal más distante. En consecuencia, el valor  $I_b$  de C4 presenta un mínimo de  $I_b=0,51$  (ver Fig. 9) en correspondencia con el máximo de carga a los 340 seg. Anteriormente, a partir de 315 seg. (900 kgf) se había detectado EA creciente de baja amplitud indicado procesos de microfisuración (nivel de carga  $P/P_{\max}=88\%$ ).

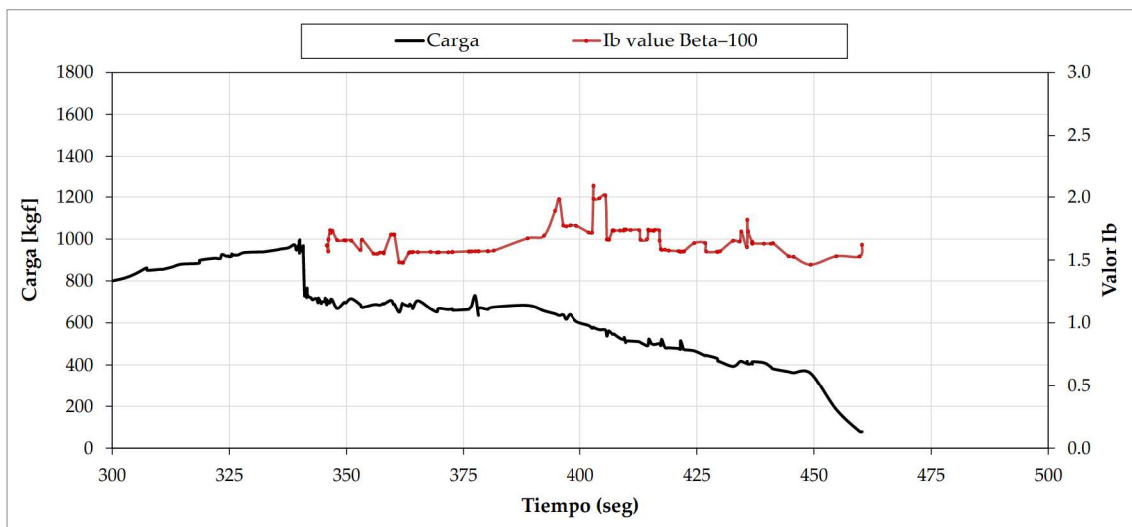


Luego del pico, el valor  $Ib$  oscila en torno a 1,20 debido al proceso de crecimiento de la fisura que moviliza los mecanismos resistentes de las fibras de acero anteriormente descritos hasta la rotura de la viga. Por su parte, el C1 detectó muchos menos eventos de EA por ubicarse en una zona intacta de la viga. El valor  $Ib$  tuvo poca variación y se ubicó por encima de 1,50 (ver Fig. 10).

En las vigas FF, los dos canales no detallados presentaron resultados de  $Ib$  con tendencias intermedias en relación de la distancia a la fractura.



**Figura 9.** Evolución del valor  $Ib$  en viga FF2 C4 (canal más cercano a la fractura).

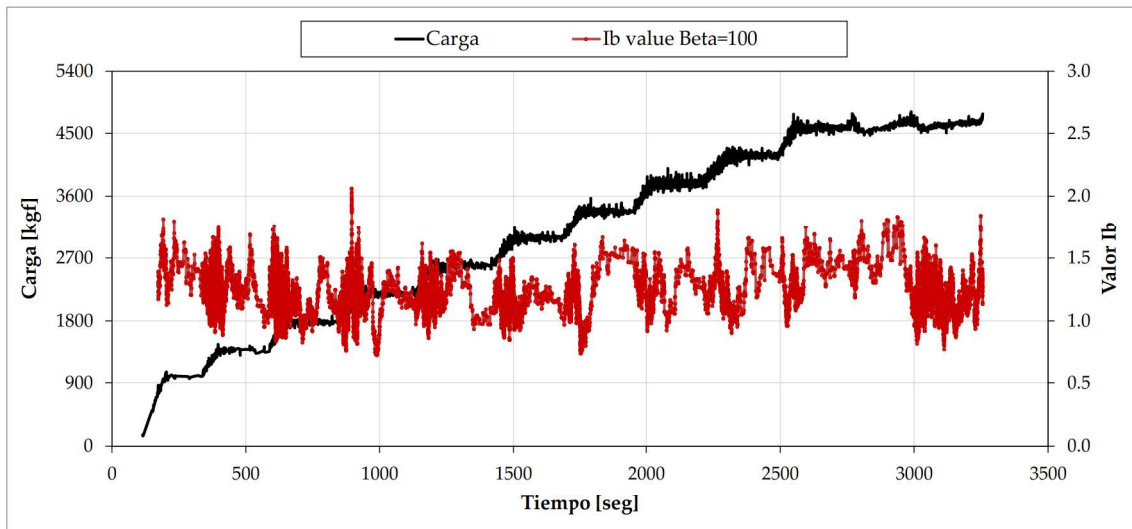


**Figura 10.** Evolución del valor  $Ib$  en viga FF2 C1 (canal más lejano a la fractura).

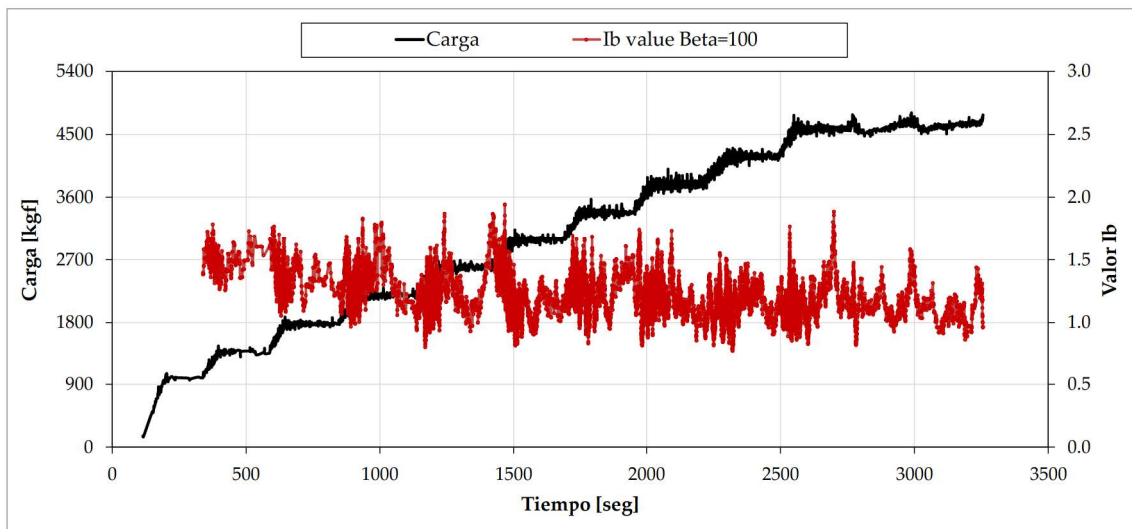
### Vigas grupo BD

En este grupo de vigas, las armaduras longitudinales redistribuyen los esfuerzos debidos a las cargas en toda su longitud. Por lo tanto, las diferencias entre canales son debidas básicamente a las etapas en que se generan las fisuras y a su severidad. Los resultados de la viga BD1 son presentados en las Fig. 11 y 12, mostrando el valor  $Ib$  obtenido en el canal 2 y en el canal 4, respectivamente. En general se aprecian valores mínimos de  $Ib$  en las etapas de carga creciente y valores mayores durante las etapas a carga constante.

Esto se debe a que el incremento de carga produce el crecimiento y avance de las fisuras con EA asociada de gran amplitud. En C2 los mínimos de  $Ib$  aparecen antes que en C4 debido a que las fisuras comienzan a aparecer en el vano central. De hecho, C2 perfora el piso de  $Ib=1,00$  en 360 seg. mientras que C4 recién lo hace en 1170 seg, coincidiendo con la detección de las primeras fisuras inclinadas en el vano de corte. Hacia la mitad final del ensayo, las fisuras en la zona central entran en la etapa de fisuración estabilizada (casi no crecen más en altura), dando lugar a valores  $Ib$  ligeramente mayores. Esto indica que esa zona ha agotado parcialmente su capacidad de tomar mayores esfuerzos y los redistribuye hacia los extremos más intactos de la viga. En cambio, en esta etapa en C4 se dan los valores mínimos debido a que las fisuras de corte se activan en la cercanía de la falla.



**Figura 11.** Evolución del valor  $Ib$  en viga BD1 C2 (canal en zona de flexión).



**Figura 12.** Evolución del valor  $Ib$  en viga BD1 C4 (canal en zona de corte).

Por último, se presentan los resultados de la viga BD2, siendo este el caso más complejo por tratarse de un proceso de carga cíclico. En las Fig. 13 y 14 se muestran los valores  $Ib$  emergentes del análisis en el canal 2 y en el canal 1, respectivamente. Como en el

caso de BD1, nuevamente se aprecia que las diferencias entre canales son debidas básicamente a las etapas en que se generan las fisuras. En general se aprecian valores mínimos de  $Ib$  en las etapas de carga creciente y valores mayores durante las etapas a carga constante y de descarga. En los ciclos repetidos se detectó menor actividad de EA debido a que no se supera la carga máxima y, por lo tanto, las fisuras no crecen significativamente. En este caso son válidas las mismas apreciaciones realizadas para la viga BD1. Como diferencia se observaron valores de  $Ib$  levemente mayores que en los casos anteriores.

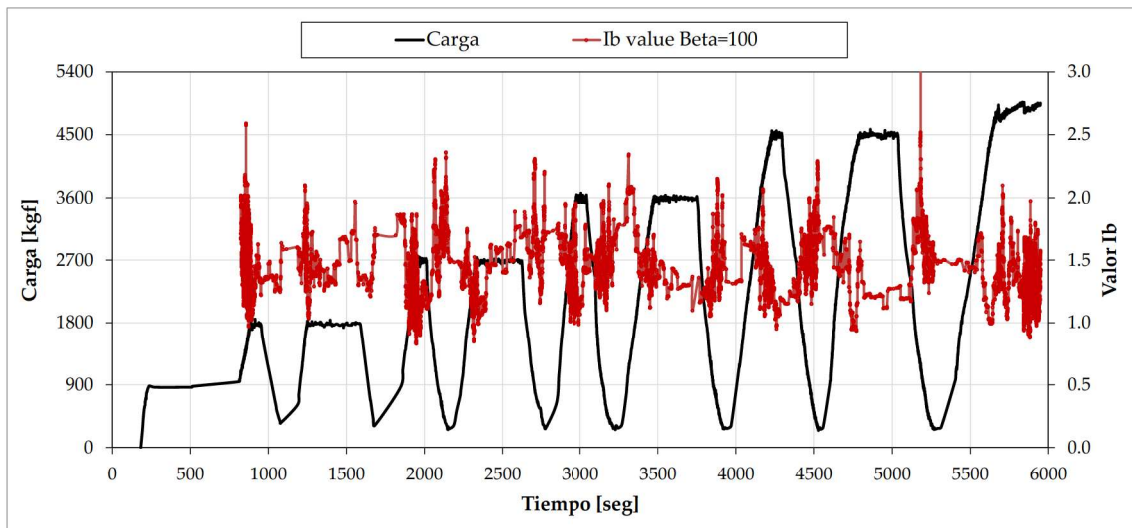


Figura 13. Evolución del valor  $Ib$  en viga BD2 C2 (canal en zona de flexión).

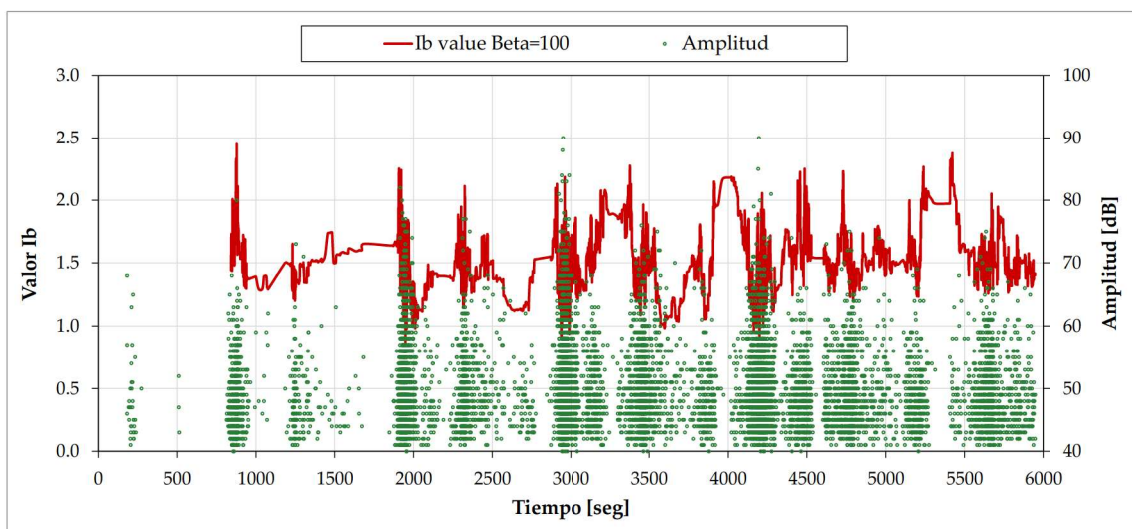


Figura 14. Evolución del valor  $Ib$  en viga BD2 C1 en superposición con la amplitud de los hits de EA (canal en zona de corte).

## CONCLUSIONES

En presente trabajo se estudió la evolución del valor  $Ib$  derivado de las señales de EA en cuatro vigas de hormigón en escala real sometidas a ensayos de carga hasta alcanzar su máxima capacidad portante. En particular, se evaluaron dos vigas con falla frágil y

refuerzo con macrofibras de acero (FF) y dos especímenes con falla dúctil y refuerzo con armaduras convencionales (BD).

Como resultado del análisis, se pueden trazar las siguientes conclusiones:

- El valor  $I_b$  presenta oscilaciones en su magnitud y es dependiente de la cantidad de eventos agrupados para su cálculo por ventanas. Incrementando la cantidad de eventos ( $\beta$ ) de ventana de cálculo tienden a disminuir los valores extremos.
- Se aprecia que la ubicación de los sensores, en relación a los esfuerzos internos y, por lo tanto, a los patrones de fisuración, tiene una incidencia considerable en los resultados. Esto se debe tener en cuenta al instrumentar con EA un elemento estructural.
- El procedimiento de carga no parece afectar significativamente al valor  $I_b$ .
- Los picos mínimos de  $I_b$  indican el crecimiento de las fisuras pero no necesariamente constituye una variable de estado de daño global de la viga. En particular, valores  $I_b$  inferiores a la unidad constituyen señales de alerta de posible fisuración severa.

A partir de lo anterior, se realiza un comentario acerca de sus posibles aplicaciones prácticas. En el caso del hormigón armado tradicional, cierta fisuración es esperable incluso para cargas de servicio y, por lo tanto, no sería posible definir a partir del valor  $I_b$  el margen de seguridad remanente. No obstante, en los casos específicos de zonas críticas o de elementos estructurales en los cuales no se admite fisuración alguna, (muchas veces elaborados con hormigón pretensado), la monitorización del valor  $I_b$  puede resultar de gran ayuda, brindando información crítica y decisiva sobre el estado de integridad estructural.

## REFERENCIAS

- Colombo S., Main I.G., Forde M.C. Assessing damage of reinforced concrete beam using “b-value” analysis of acoustic emission signals. *Journal of Materials in Civil Eng.*, 15, 280-286 (2003).
- Fielder G. Local b-values related to seismicity, *Tectonophysics*, 23, 277-282 (1974).
- Gutenberg B., Richter C.F., *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton University Press, Princeton, 2da Ed. (1954).
- Nair A. and Cai C.S. Acoustic emission monitoring of bridges: review and case studies. *Engineering Structures* 32, 1704–1714 (2010).
- Proverbio, E. Evaluation of deterioration in reinforced concrete structures by AE technique. *Materials and Corrosion* 62 (2), 161-169 (2011).
- Rao, M.V.M.S. Significance of AE-based b-value in the study of progressive failure of brittle rock: Some examples from recent experiments. Proc. 14th World Conference on Non-Destructive Testing (14th WCNDT), Oxford & IBH, New Delhi, 4, 2463–2467 (1996).
- Rao M.V.M.S., Prasanna-Lakshmi K..J. Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture. *Current Science*, 89(9), 1577-1582 (2005).
- Sagar V. A parallel between earthquake sequences and acoustic emissions released during fracture process in reinforced concrete structures under flexural loading. *Construction and Building Materials* 114, 772-793 (2016).
- Shearer P.M. Introduction to Seismology. Cambridge University Press, Cambridge, 2da Ed. (2009).
- Shiotani T., Fujii K., Aoki T. and Amou K. Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model tests, *Progress in AE VII*, 529-534 (1994).
- Shiotani T., Yuyama S., Li Z.W., Ohtsu M. Application of AE improved b-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials. *Journal of Acoustic Emission*, 19, 118-132 (2001).
- Smith W. The b-value as an earthquake precursor. *Nature*, 289, 136-139 (1981).
- Vélez W., Matta F., and Ziehl P. Acoustic emission monitoring of early corrosion in prestressed concrete piles. *Struct. Control Health Monit.* 22, 873–887 (2015).
- Xargay H., Ripani M., Folino P., Núñez N., Caggiano A. Acoustic emission and damage evolution in steel fiber-reinforced concrete beams under cyclic loading. *Construction and Building Materials* 274, 121831 (2021).

# DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS SOBRE LA ACCIÓN DEL FUEGO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Marianela Ripani<sup>a,b</sup>, Hernán Xargay<sup>a,b,c</sup>, Paula Folino<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Metodos Numericos en Ingenieria (LMNI-LAME), Buenos Aires, ARGENTINA.

<sup>b</sup>CONICET - Universidad de Buenos Aires, Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN), Buenos Aires, Argentina

<sup>c</sup>ICES, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), ARGENTINA

e-mail: [mripani@fi.uba.ar](mailto:mripani@fi.uba.ar)

## RESUMEN

*El fuego representa una de las amenazas más destructivas que pueden afectar a cualquier tipo de estructura civil durante el transcurso de su vida útil. Como es bien sabido, uno de los materiales más utilizados en el ámbito de la construcción civil es el hormigón armado. Si bien el hormigón es un material de baja conductividad térmica, en comparación con el acero y con otros materiales frecuentemente empleados en la industria la de construcción, frente a un incendio el hormigón no está exento de sufrir daños graves e irreparables que pueden comprometer la resistencia y la estabilidad de toda la estructura que compone. En cuanto a métodos de modelización para la acción del fuego en el análisis estructural de construcciones civiles, se utilizan diferentes niveles de complejidad que incluyen desde el uso de curvas de fuego estandarizadas hasta el desarrollo de modelos numérico-computacionales para la resolución de las ecuaciones diferenciales de la dinámica de fluidos. Existen diversas normas internacionales que abordan el análisis estructural de las estructuras civiles frente a fuego, siendo las de origen europeo las más completas en cuanto al tratamiento del hormigón. En este trabajo se presentan los lineamientos principales de la propuesta del Eurocódigo, basada tanto en enfoques prescriptivos como en el desempeño estructural. Los lineamientos del Eurocódigo son comparados con los propuestos por las normas norteamericanas, las cuales presentan un enfoque principalmente prescriptivo. Finalmente se revisan los lineamientos de la reglamentación argentina al respecto.*

Palabras Clave: Hormigón Armado, Fuego, Disposiciones Reglamentarias.

## INTRODUCCIÓN

Definitivamente el descubrimiento del fuego hace miles de años, marcó un paso evolutivo para la humanidad, trayendo consigo varias facilidades para la vida humana, como repararse del frío, cocer alimentos, iluminarse en la oscuridad, etc. Sin embargo, hasta el día de hoy, el fuego no controlado o incendio constituye a su vez una gran amenaza para la vida del hombre y su espacio vivido. Existen numerosos ejemplos de catástrofes provocadas por incendios que marcaron la historia de la población humana. Entre distintos casos emblemáticos de incendios a gran escala se pueden citar el gran fuego de Edimburgo desatado en el año 1824 y el de Chicago en 1871 (Traynor S., 2020; Lapham I. A., 1872). En ambos casos, el incendio duro varios días, centenares de habitantes perdieron sus viviendas y varios edificios históricos se vieron dañados. Un ejemplo más contemporáneo de un incendio que provoco grandes daños es el ocurrido en el Channel Tunnel en 1996. Se trata de tres túneles subacuáticos que vinculan a

Inglaterra y Francia, de una longitud aproximada de 50km cada uno. El incendio duró aproximadamente diez horas y se desató a causa de un desperfecto ocurrido en un camión transportado por un tren dentro de uno de los túneles. Para la rehabilitación del túnel afectado se requirieron alrededor de seis meses, con un costo aproximado de US\$1.5m por día, lo cual involucraba los costos de reparación y las pérdidas por el cese de operaciones de dicho túnel (Santo-Reyes J., Beard A. N., 2017). Otro ejemplo de los efectos devastadores del fuego es el incendio en el edificio Windsor ocurrido en el año 2005 en Madrid, España. Aparentemente el fuego se inició por ignición de artículos de oficina en uno de los departamentos del piso veintiuno. En veinte minutos el fuego alcanzó el piso mas alto del edificio de treinta y dos plantas y de 960m<sup>2</sup> cada una. La estructura del edificio estaba conformada por elementos de acero y hormigón armado. Afortunadamente, no hubo víctimas fatales porque el edificio se encontraba evacuado por reparaciones al momento del incendio. El edificio tuvo que ser demolido y las pérdidas económicas rondaron los doscientos millones de euros, considerando los daños ocasionados y el lucro cesante (Calavera Ruiz J., et. al., 2007).

En cuanto al desempeño de una estructura frente a fuego, existen tres modos principales de evaluación: (1) el tiempo hasta la falla, (2) la resistencia o capacidad de soportar cargas y (3) la temperatura crítica del material. Cabe destacar que el tiempo hasta la falla, para elementos estructurales simples, se mide dentro de un horno utilizando una curva de fuego estandarizada, temperatura vs. tiempo. Dicho tiempo debe ser mayor o igual a la duración del incendio. La capacidad de carga estructural debe ser mayor o igual a las cargas actuantes en el estado limite del fuego. La temperatura crítica del material debe ser menor a la temperatura máxima alcanzada por el material durante el incendio. Para llevar a cabo todas las formas de evaluación mencionadas, es menester determinar tres pilares fundamentales del análisis de una estructura sometida a un incendio: (1) las condiciones del incendio, es decir las características del fuego, (2) la respuesta térmica de la estructura, es decir los mecanismos de transporte de calor que actúan sobre la estructura y, (3) la respuesta mecánica estructural previa a la degradación de las propiedades mecánicas del material y luego de la misma (SFPE, 2002; Lataille J. I, 2003; Purkis J. A. et. al, 2013; Bangash M., et. al., 2014).

Las reglamentaciones y guías de diseño existentes referidas al análisis del desempeño estructural frente a fuego suelen tener mayormente un enfoque prescriptivo. Esto significa que proveen información tabulada para las acciones térmicas de un fuego nominal sobre un material dado, y para la transferencia de calor en elementos estructurales aislados y de geometrías sencillas, pudiéndose utilizar modelos de calculo simples o avanzados para el análisis de las acciones mecánicas. Afortunadamente, en las últimas décadas las reglamentaciones tienen a dar lineamientos basados en el desempeño de la estructura. Esto significa que no se imponen los métodos de cálculo frente a fuego, como tienden a hacer los lineamientos prescriptivos, mas bien se imponen parámetros de desempeño mínimos que se esperan de la estructura sometida al fuego y para este fin, el proyectista puede servirse de modelos de cálculo simples y/o avanzados para representar la fisicoquímica del problema y determinar las acciones térmicas, así como, las acciones y la respuesta mecánica de la estructura (ASCE 2005; FIB-CEB-FIP 2007; Vassart O., et. al., 2014).

A continuación, en las siguientes secciones, se dará una breve introducción sobre las características de un incendio nominal frente a un incendio real, y se presentaran

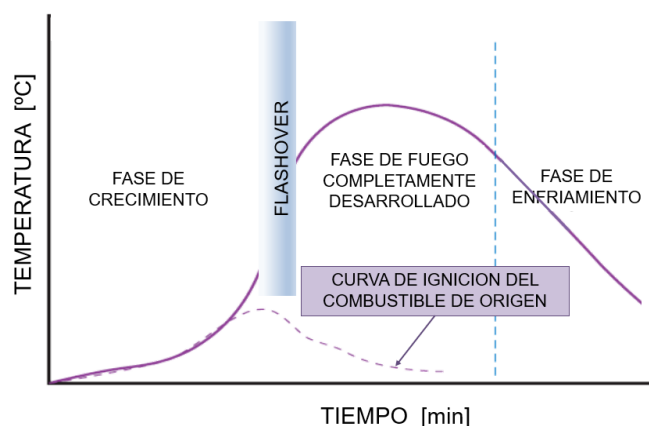
algunos de los métodos principales para el diseño del fuego propiamente dicho, propuestos en la reglamentación vigente. Se mostrarán también algunos modelos de transferencia de calor mayormente utilizados por las reglamentaciones existentes y las leyes de degradación de las propiedades físico-mecánicas del hormigón en particular, que son presentadas en las normas existentes. Finalmente, se discutirán los diferentes enfoques propuestos para el diseño estructural frente a fuego, dados en las normas europeas (PrEN 1991-1-2, 1992; PrEN 1992-1-2, 2004), las norteamericanas (ACI 216.1-14, 2014) y particularmente en el reglamento argentino para el diseño de estructuras de hormigón armado (CIRSOC 201-2005, 2005).

## MÉTODOS PARA EL DISEÑO DEL FUEGO

A continuación, se describen brevemente el fenómeno del fuego, los factores que intervienen para su desarrollo, las características que posee un incendio real confinado y los métodos para el diseño del fuego.

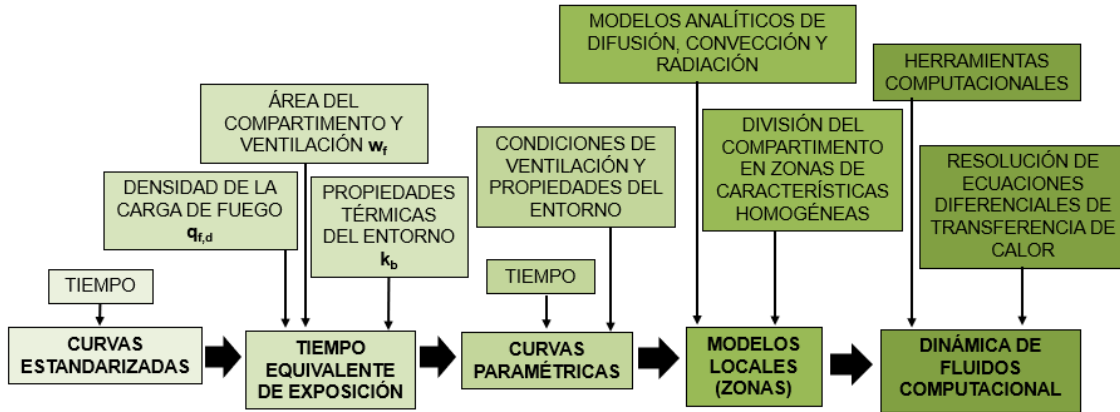
Para que el fenómeno del fuego perdure en el tiempo deben existir en forma simultánea cuatro factores; el combustible, el oxígeno, el calor y una reacción en cadena. Estos cuatro aditamentos conforman lo que suele llamarse el tetraedro del fuego. El fuego comienza con la pirolisis, que es la descomposición del combustible, ya sea sólido o líquido, cuando es expuesto a una fuente de calor, dando lugar a los gases de la combustión. A continuación, tiene lugar la ignición, aparecen las llamas y se desarrolla la reacción en cadena entre el combustible, el oxígeno y el calor. Cuando alguno de estos componentes se consume o desaparece totalmente, el fuego se extingue.

En gran parte de las estructuras civiles donde el fuego representa una fuerte amenaza para la vida y posesiones de las personas, como pueden ser edificios de viviendas, oficinas y sitios cerrados el fuego tiene la particularidad de estar confinado. En un fuego confinado se pueden reconocer cuatro fases; (1) el periodo de crecimiento donde las llamas se mantienen en la zona de los combustibles de origen, (2) el flashover cuando los combustibles de origen arden de forma completa y el fuego comienza a propagarse rápidamente fuera del foco inicial, (3) la fase de desarrollo donde los materiales combustibles adyacentes al foco original del incendio comienzan a arder y finalmente (4) la fase de declinación, cuando el fuego se extingue por falta de combustible u oxígeno. Dichas fases pueden verse en la Figura 1.



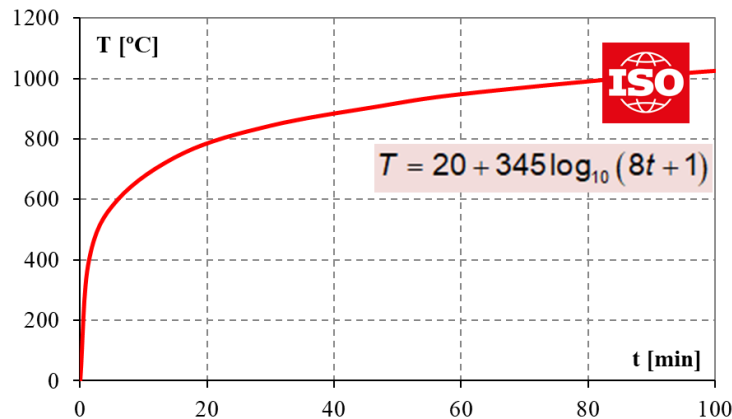
**Figura 1.** Fases de un fuego natural confinado.

La determinación de las características del fuego constituye uno de los pilares fundamentales del diseño estructural frente a fuego. Existen diversos métodos simplificados para caracterizar el fuego, los cuales presentan distintos niveles de complejidad. A continuación, se describen algunos de los más relevantes, los cuales se resumen en el esquema de la Figura 2.



**Figura 2.** Métodos de diseño del fuego.

Las curvas estandarizadas de temperatura relacionan la temperatura con una única variable, el tiempo. Por lo tanto, se obtiene una temperatura homogénea para todo el compartimento o espacio cerrado donde se desarrolla el fuego, para distintos momentos del incendio. Las temperaturas de la curva estandarizada corresponden a la temperatura dentro de un horno de ensayo durante la fase de desarrollo del fuego sin contemplar ningún tipo de enfriamiento. La curva estandarizada más utilizada y de carácter internacional es la ISO 834 presentada en la Figura 3 (ISO 834-1, 1999), pero también se puede citar la curva ASTM E119 (ASTM Standard E119-05, 2005).



**Figura 3.** Curva de fuego estándar ISO-834.

El método del tiempo equivalente de exposición relaciona la severidad de un incendio real con un tiempo equivalente de duración de la curva estándar. Dicho tiempo equivalente de diseño es comparado con el tiempo de resistencia de los elementos estructurales que componen el compartimento, debiendo verificarse la expresión  $t_{(e,d)} \leq t_{(fi,d)}$ , donde  $t_{(e,d)}$  es el tiempo equivalente de diseño y  $t_{(fi,d)}$  es el tiempo de resistencia del elemento. El tiempo equivalente de diseño se define como  $t_{(e,d)} = q_{(fi,d)} * w_f * k_b$ ,

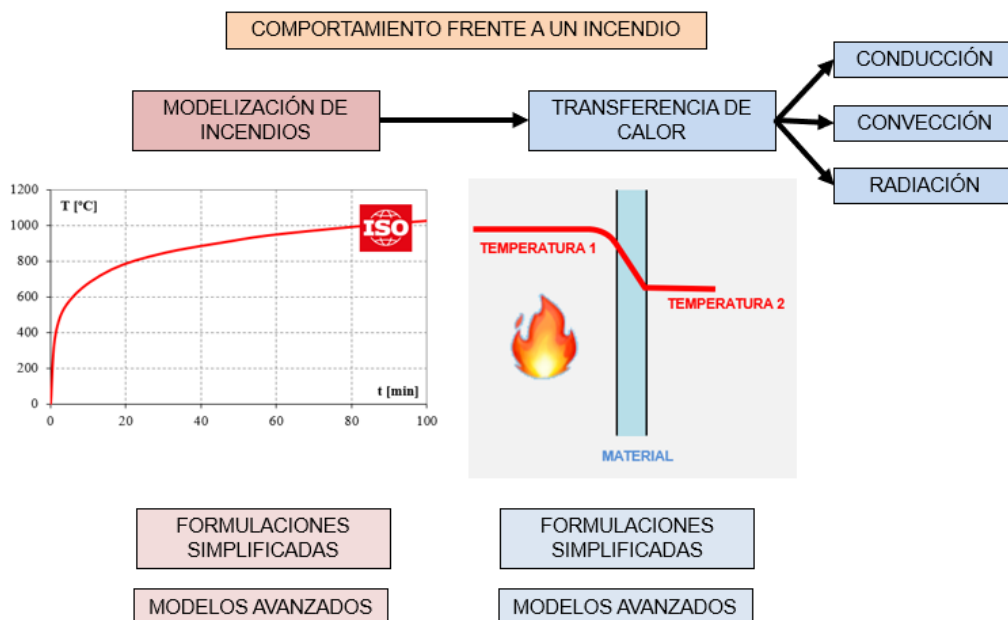


donde  $q_{(fi,d)}$  es la densidad de la carga de fuego,  $w_f$  es el factor de ventilación y  $k_b$  el factor que representa las propiedades térmicas de los cerramientos del compartimiento.

Las curvas paramétricas relacionan el tiempo y la temperatura de manera similar a las curvas estandarizadas, pero además consideran otras características del compartimiento como: densidad de la carga de fuego dentro del compartimiento, número y tamaño de las aberturas, dimensiones del compartimiento, propiedades térmicas de los cerramientos, etc. Contemplan la fase de desarrollo del incendio y también la fase de enfriamiento.

Existen también modelos avanzados para el diseño del fuego, donde se busca determinar más realísticamente el efecto de las llamas y los gradientes térmicos del aire dentro del compartimiento. Estos modelos permiten diferenciar entre un fuego localizado o uno desarrollado, además de tener en cuenta la diferencia en el comportamiento del fenómeno según las llamas alcancen o no el techo del recinto. Dentro de los modelos avanzados, se destacan los modelos de zonas y los softwares basados en el método de los elementos finitos donde es posible resolver de forma aproximada las expresiones matemáticas de la dinámica de fluidos continuos. Evidentemente, estos métodos presentan mayor complejidad de aplicación y por tal motivo su uso suele limitarse a estructuras de características particulares en condiciones de exposición severas.

Una vez determinada la temperatura del aire dentro del compartimiento en función del tiempo y del espacio, es necesario determinar la temperatura y los gradientes térmicos originados en los elementos estructurales del recinto. Para este fin se utilizan los modelos de transferencia de calor, que consideran los fenómenos de convección, radiación y conducción. Estos modelos también pueden presentar distintas complejidades de aplicación, dependiendo del caso en estudio y del nivel de precisión deseada (Figura 4).



**Figura 4.** Esquema del procedimiento para la determinación del perfil térmico en elementos estructurales.

En general, cuando se emplean curvas de fuego estandarizadas para determinar la acción del fuego, se suelen utilizar formulaciones simples para caracterizar al fenómeno

de transferencia de calor a través de los materiales. En este sentido son útiles los ábacos de perfiles térmicos propuestos por las normas (PrEN 1992-1-2, 2004; ACI 216.1-14, 2014) o bien, formulaciones analíticas como las que proponen Wickstrom y Hertz (Wickstrom U., 1986; Purkiss et. al., 2014). En caso de utilizarse curvas de temperatura paramétricas para determinar la acción del fuego, se recomienda entonces utilizar algún modelo de análisis de transferencia de calor más complejo, como, por ejemplo, la resolución de las ecuaciones diferenciales de difusión de temperatura utilizando algún método numérico como el método de los elementos finitos, o bien, recabando datos de experiencias experimentales sobre estructuras similares en condiciones térmicas semejantes. En la Figura 5, se resume en forma esquemática lo anteriormente expuesto.

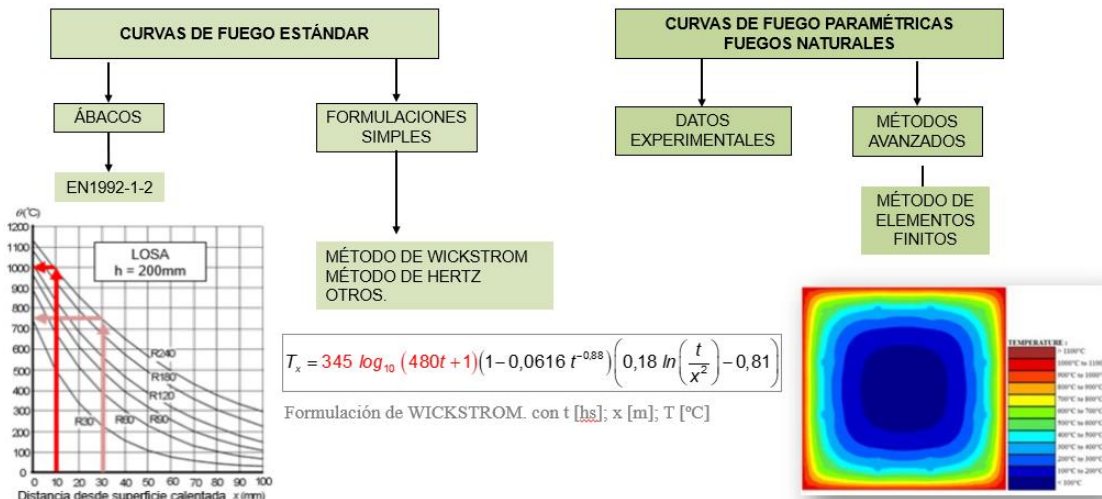


Figura 5. Modelos de transferencia de calor

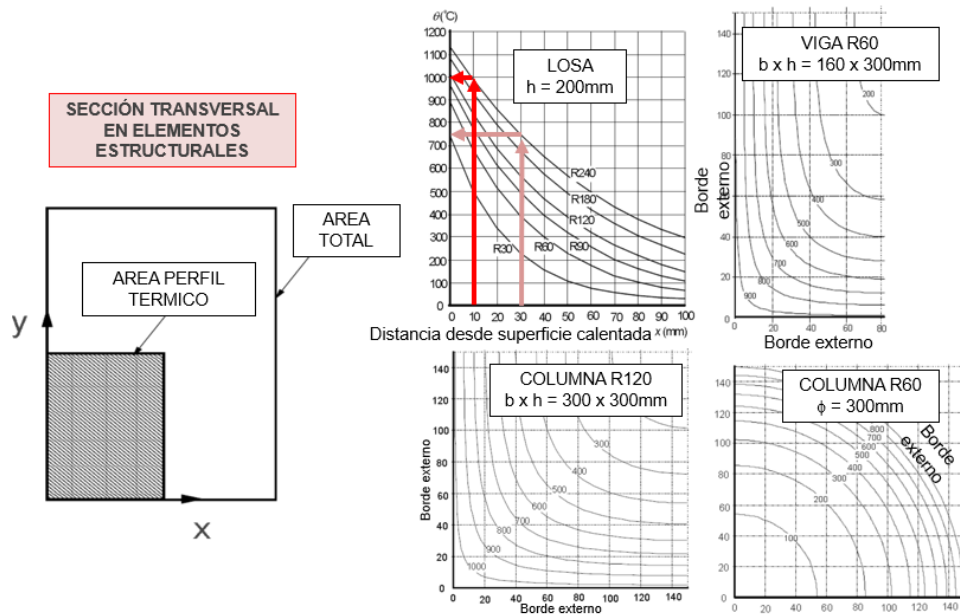


Figura 6. Ejemplos de ábacos para la determinación del perfil térmico en elementos estructurales de hormigón.

En el caso particular del hormigón, las normas proponen diversos ábacos para secciones transversales de columnas, vigas y losas que presenten doble simetría, con valores

estándar de calor específico, conductividad y emisividad térmica, factor de convección etc. En la Figura 6 se muestran algunos ejemplos de estos ábacos (PrEN 1992-1-2, 2004).

Las normas también proponen leyes de variación para las propiedades termo-fisico-mecánicas del hormigón en función de la temperatura, como, por ejemplo: el calor específico, la conductividad térmica, la densidad, la resistencia a tracción y compresión, el módulo de Young y las leyes constitutivas tensión-deformación para los ensayos de compresión y tracción uniaxial. Estas leyes en general se dividen en función del tipo de agregados gruesos empleados para el hormigón, ya sean calcáreos o silíceos.

## **DISCUSIÓN**

La ingeniería de seguridad contra incendios establece que la evaluación del riesgo de una estructura frente a fuego depende de varios factores, entre ellos, del desempeño de la estructura y de la instalación y mantenimiento de sistemas de protección contra incendios pasivos y/o activos. En base a estos factores, se deben establecer márgenes de seguridad adecuados. Por ejemplo, cuando se utilice un único sistema de protección contra incendio, deben utilizarse mayores factores de seguridad que en aquellos casos donde se combinen distintas soluciones de protección.

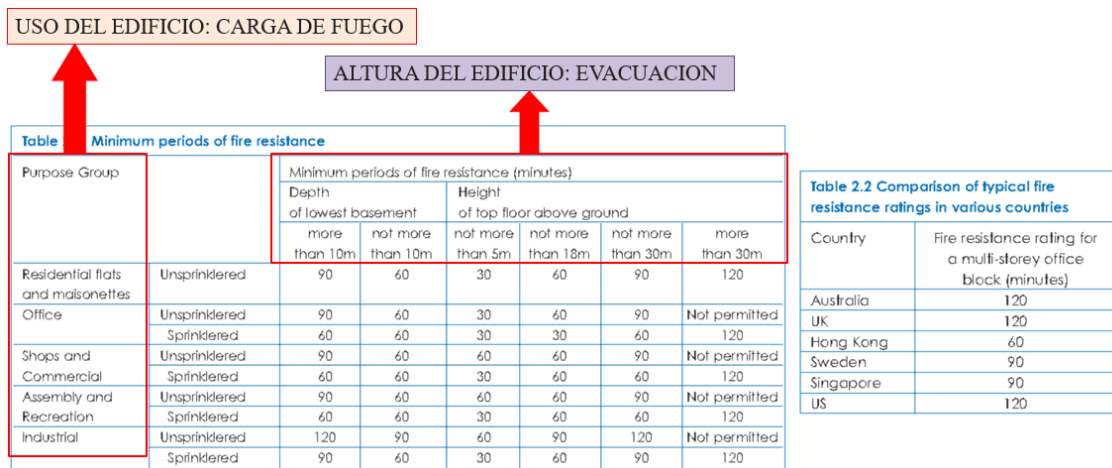
Por otra parte, y desde el punto de vista de la ingeniería civil, es de suma importancia considerar la interacción entre el fuego y la estructura completa, más allá de que el incendio afecte a un grupo limitado de elementos estructurales. Esto significa que no solo se deben estudiar los elementos estructurales involucrados en el incendio como elementos aislados, sino que, se debe considerar la respuesta global de la estructura, lo cual puede conllevar a escenarios de falla más vulnerables.

Los niveles de complejidad del diseño estructural frente al fuego podrían dividirse en tres: (1) uso de reglas prescriptas, generalmente provistas por las normas, para el diseño de elementos estructurales simples, (2) aplicación de fuegos paramétricos en elementos estructurales simples, teniendo en cuenta la degradación del material y, (3) uso de modelos de elementos finitos combinados con las expresiones de fuegos paramétricos para la evaluación del comportamiento global de una estructura más compleja.

En su mayoría, las reglamentaciones vigentes presentan un enfoque prescriptivo del diseño frente a fuego. Esto significa que establecen el modo y las herramientas para realizarlo. Ejemplos de lineamientos prescriptivos para el diseño estructural frente a fuego dados por las normas son la especificación de los materiales permitidos, de los espesores y recubrimientos mínimos de cada tipo de elemento estructural, de los factores de seguridad basados en datos históricos, etc., utilizando mayormente exposiciones a fuego estándar. En cuanto a condiciones más generales, ligadas al diseño de la construcción, se pueden citar la separación mínima entre edificios, las distancias máximas de evacuación, las características mínimas de los sistemas de detección, alarma, supresión y ventilación, entre otras.

En las últimas décadas, la tendencia de las nuevas reglamentaciones es orientar el diseño frente a fuego hacia un enfoque basado en el desempeño. En este sentido, las normas se enfocan en los requerimientos prestacionales a cumplir, sin establecer el modo o las herramientas en las que se basará el diseño, tarea que será una decisión del proyectista y que será válida siempre y cuando los resultados finales de prestación cumplan con los objetivos de desempeño establecidos por las reglamentaciones. Las

temperaturas máximas que debe soportar la estructura, o bien, los tiempos mínimos en los que debe mantener su capacidad de carga, junto a criterios de separación, integridad y aislación térmica, son ejemplos de condiciones de desempeño, es decir, son requisitos prestacionales. En otras palabras, en el diseño frente a fuego por desempeño, no tiene relevancia el método de cálculo utilizado, ni los espesores, ni los recubrimientos adoptados, siempre y cuando se demuestre que se cumple el requisito prestacional exigido por la norma. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de requerimiento prestacional en función del tiempo, para distintos tipos de edificios según el destino, la altura máxima de los mismos y la instalación o no de sistemas de protección activos.



**Figura 7.** Tiempos mínimos de resistencia a fuego según el tipo de construcción (ISTRUCTE, 2003).

A continuación, se citan algunas características principales de las normas europea y americana para el diseño estructural frente a fuego.

El Eurocódigo (PrEN 1992-1-2, 2004) propone tres niveles de análisis para el diseño estructural frente a fuego: (1) la evaluación de elementos estructurales aislados, (2) el estudio de una parte de la estructura y (3) el análisis de la estructura completa. En el análisis de la estructura completa, se busca considerar la modificación de las condiciones de los vínculos estructurales debido a las deformaciones experimentadas por la acción de las altas temperaturas. Esto significa, por ejemplo, que un elemento estructural, como es el caso de una viga, que originalmente soportaba esfuerzos predominantes de flexión, en condiciones de incendio puede experimentar esfuerzos normales predominantes debidos a la aparición de un nuevo comportamiento del tipo catenaria. En el caso de las losas o elementos superficiales, un comportamiento del tipo placa puede transformarse en un comportamiento del tipo membranal. El Eurocódigo también hace énfasis en la degradación del material con el incremento de la temperatura y propone leyes de variación de sus propiedades fisico-mecánicas dependientes de la temperatura alcanzada. En resumen, el Eurocódigo permite realizar análisis estructurales frente a fuego que contemplen la no linealidad del análisis geométrico y material.

En la norma americana (ACI 216.1-14, 2014) no existe un marco equivalente al Eurocódigo en cuanto al análisis global de las estructuras frente a fuego, es decir, el diseño estructural tiende a centrarse en elementos individuales. Sin embargo, cabe destacar que estas normas contemplan la degradación material frente a las altas

temperaturas, de un modo similar al Eurocódigo. En general la norma americana presenta un enfoque mayormente prescriptivo donde toma especial protagonismo la especificación de espesores y recubrimientos mínimos de los elementos estructurales. La determinación de los factores de seguridad estructural se basa principalmente en la experiencia y para determinar la acción del fuego en la estructura comúnmente utilizan curvas de fuego estándar, ya sea la ISO 834 o la ASTM E119 (ISO 834-1, 1999; ASTM Standard E119-05, 2005).

En cuanto a la reglamentación argentina para el diseño de estructuras de hormigón armado, el CIRSOC 201 (CIRSOC 201-2005), que se basa en la norma americana ACI (ACI 318, 2005), solo especifica espesores y recubrimientos mínimos de los elementos estructurales para el caso de presentarse acciones de fuego. Es decir, no existen en el reglamento argentino, métodos de diseño estructural que contemplen la acción del fuego. En este sentido, el reglamento reconoce que, en un futuro, será necesaria una publicación específica de la norma, dedicada al diseño frente a fuego de estructuras de hormigón armado.

## **CONCLUSIONES**

Indudablemente, el fuego puede tener efectos devastadores sobre las construcciones civiles. Dependiendo del tipo de material los daños fatales pueden producirse en mayor o menor grado, más rápida o lentamente. El hormigón suele ser un material de respuesta muy noble frente al fuego en comparación con otros materiales de la construcción como el acero o la madera. Sin embargo, dependiendo del tiempo de exposición, los daños pueden resultar irreversibles y la resistencia y estabilidad de la estructura pueden resultar gravemente afectadas.

El objetivo de la ingeniería de protección contra incendios es eliminar o al menos reducir el riesgo de muerte de los ocupantes y el deterioro de las construcciones vecinas, buscando mantener la resistencia del edificio durante un periodo de tiempo determinado. Por su parte, la ingeniería civil tiene un rol fundamental en el diseño estructural frente a fuego y las disposiciones reglamentarias al respecto suelen ser insuficientes en algunos países como es el caso de Argentina.

El Eurocódigo ofrece tanto pautas y métodos de diseño de carácter prescriptivo como basados en el desempeño. En este último caso, las normas permiten la implementación de métodos avanzados de cálculo que posibilitan la optimización de las soluciones. Por su parte, la norma americana ACI tienen un enfoque mayormente prescriptivo, gran parte de los lineamientos se refieren a la especificación de características geométricas mínimas de los elementos estructurales, según los tiempos necesarios de resistencia frente a un incendio.

El reglamento argentino para el diseño de estructuras de hormigón armado, CIRSOC 201, no ofrece métodos de diseño para el cálculo estructural frente a fuego. Las especificaciones se limitan al cumplimiento de recubrimientos y espesores mínimos de elementos estructurales simples, de forma similar a lo establecido por la norma americana ACI, reglamentación en la cual se basa el reglamento argentino.

Finalmente, cabe destacar que queda en evidencia la necesidad de una reglamentación argentina para el diseño frente a fuego de elementos estructurales. En base a la

experiencia internacional dicha reglamentación debería basarse en requisitos mínimos prestacionales.

## REFERENCIAS

- 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.
- ACI Committee 318, 2005. Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- 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.
- Bangash, M. Y. H., Al-Obaid, Y. F., & Bangash, F. N. (2014). Fire Engineering of Structures: Analysis and Design. Springer.
- Calavera Ruiz J., Cano Muñoz J. L., Gonzalez del Valle E., Diaz Lozano J., Fernandez Gomez J., Ley Urzaiz J., Izquierdo J. M., De Quirós B., 2007. Comportamiento de la estructura del edificio Windsor de Madrid frente al incendio sufrido. Revista Ingeniería Estructural, Asociación de ingenieros estructurales. Año 15, Nro 37 ISSN 1667.
- FIB-CEB-FIP (2007), Fire design of concrete structures-materials, structures and modelling. State of-art report Bulletin nº 38. The International Federation for Structural Concrete.
- ISO 834-1, 1999. "Fire resistance tests - elements of building construction. Part 1: general requirements International Organization for Standardization. Geneva.
- ISTRUCTE, 2003. Introduction to the fire safety engineering of structures, pp. 64.
- Lapham I. A., 1872. The great fires of 1871 in the Northwest. Journal of the Franklin Institute, 93 (6), 413-417.
- Lataille J. I., 2003. Fire Protection Engineering in Building Design. Ed. Plant Engineering Butterworth-Heinemann, pp. 133.
- PrEN 1991-1-2, 1992. Eurocode 1 – Actions on Structures. Part 1-2 : General Actions – Actions on structures exposed to fire, Final Draft Stage 49. European Committee for Standardization, Brussels, 10 January 2002.
- PrEN 1992-1-2, 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. European Committee for Standardization, Brussels, December 2004.
- Purkiss, J. A., & Li, L. Y., 2013. Fire safety engineering design of structures. CRC press.
- SFPE, 2002, Guide to performance-based fire protection analysis and design of buildings, Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, Maryland.
- Traynor S., 2020. The Great Fire of Edinburgh: The blaze that shook the city to its core in 1824. [edinburghlive.co.uk](http://edinburghlive.co.uk).
- Reglamento CIRSOC 201-2005. Reglamento Argentino de estructuras de hormigón armado. Edición 2005. Instituto nacional de tecnología industrial.
- Santo-Reyes J., Beard A. N., 2017. An analysis of the 1996 Channel Tunnel fire. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 231 (8), 850-876. Sage Publications Limited.
- Vassart O., Zhao B., Cajot L. G., Robert F., Meyer U., Frangi A., 2014. Eurocodes: Background & Applications. Structural Fire Design. Worked examples. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Pp 235.
- Wickstrom U., 1986. A very simple method for estimating temperature in fire exposed concrete structures. SP Rapport, ISSN 0284-5172, 46.



ISBN 978-987-1323-86-9

ISBN 978-987-1323-86-9



9 789871 323869



Comisión Nacional  
de Energía Atómica