

# Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



Ruta Nacional N° 60. Camino Paso San Francisco. Paraje: Chaschuil. Catamarca.  
*Fotografía: Roberto Gaspar Lencina.*



**ASAGAI**  
ASOCIACIÓN ARGENTINA  
DE GEOLOGÍA APLICADA  
A LA INGENIERÍA



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoresasagai.org.ar/>  
Dueñas, D. A., Sosa, G. del R. y Ojeda, G.E.

Influencia de la actividad antrópica sobre la morfodinámica del río Quinto para el período 1975-2020 en Villa Mercedes, San Luis, Argentina  
e001, <https://doi.org/10.59069/24225703e001>

# Influencia de la actividad antrópica sobre la morfodinámica del río Quinto para el período 1975 - 2020 en Villa Mercedes, San Luis, Argentina

## Influence of anthropogenic activity on the morphodynamics of the Quinto river for the period 1975 - 2020 in Villa Mercedes, San Luis, Argentina

 Daniel Alejandro Dueñas <sup>1</sup> \*  Graciela del Rosario Sosa <sup>1,2</sup>   Guillermo Enrique Ojeda <sup>1,2</sup> 

\* Autor de contacto

Recibido: 26 de julio de 2022 • Aceptado: 13 de febrero de 2022 • Publicado: 02 de junio de 2023

### Resumen

Las ciudades en su crecimiento ocasionan cambios alterando el relieve con fines de mejorar las condiciones de vida. Así, modifican los procesos naturales como ha sucedido en el río Quinto, en el tramo ubicado inmediatamente al sur de la ciudad de Villa Mercedes, provincia de San Luis. Por ello, el objetivo de este trabajo es presentar una serie de observaciones y parámetros geomorfológicos con la finalidad de identificar cambios en el sistema fluvial que fue afectado por embalses y azudes. La zona se caracteriza por presentar relieves de edad Cuaternaria donde la acción eólica es el principal proceso involucrado en el modelado de las geoformas en las planicies alledañas al valle, con una participación fluvial subordinada. Por otra parte, el tramo en estudio presenta una fuerte presión antrópica que incide en los procesos y dinámica del cauce fluvial.

Se analizaron las variaciones morfodinámicas del cauce y sus posibles causas en base al análisis multitemporal para el periodo 1975-2020 mediante fotografías aéreas, imágenes satelitales de Google Earth® y reconocimiento de campo. Como resultado principal del trabajo se han reconocido los siguientes cambios: aumento en la sinuosidad del canal principal, rectificación de tramos y modificación de las márgenes debido en parte a la construcción de un muro de contención para las crecidas y la extracción de áridos. En suma, las intervenciones han dado lugar a procesos de erosión y sedimentación con la consolidación de una gran isla dentro del cauce, la colmatación del embalse Villa Mercedes, la socavación de las márgenes y el acorazamiento del lecho fluvial.

**Palabras clave:** análisis multitemporal, morfodinámica, río Quinto, provincia de San Luis

1. Universidad Nacional de San Luis, FCFMyN, Dpto. de Geología. Av. Ejército de los Andes 950, San Luis, Argentina.

2. Universidad Nacional de Villa Mercedes. Esc. Ingeniería y Medio Ambiente. Las Heras 930, Villa Mercedes. Argentina.

## Abstract

The cities in their growth cause changes altering the relief to improve living conditions. Thus, they modify natural processes such as has happened in the Quinto River, in the area located immediately southward of Villa Mercedes city, San Luis province. Therefore, the objective of this work is to present a series of observations and geomorphological parameters to identify changes in the fluvial system that was affected by reservoirs and dams. The area is characterized by reliefs of Quaternary age where wind action is the main process involved in the modeling of the geomorphs located in the plains surrounding the valley, with a subordinate fluvial participation. On the other hand, the section under study presents a strong anthropic pressure that influences the processes and dynamics of the riverbed.

The morphodynamical variations of the riverbed and their probable causes were analyzed based on a multitemporal analysis for the period 1975-2020 by means of aerial photographs, Google Earth® satellite images and field reconnaissance. The following changes have been recognized as the main result of the work: increase in the sinuosity of the main channel, rectification of stretches and modification of the banks due, in part, to the construction of a floodwalls and sand quarrying. In short, the interventions have resulted in erosion and sedimentation processes with the consolidation of a large island within the channel, the siltation of the Villa Mercedes reservoir, the undermining of the banks and the armoring of the riverbed.

**Keywords:** multitemporal analysis, morphodynamics, Quinto River, San Luis province

## Introducción

Los ríos son parte del paisaje con el que conviven los habitantes de los territorios. Las ciudades en su crecimiento ocasionan cambios, modifican el relieve, expanden los límites urbanos y cambian los espacios existentes en busca de mejorar las condiciones de vida. Estas acciones afectan los procesos naturales y alteran las geoformas que constituyen el medio físico. Tal es el caso del río Quinto en el tramo que fluye por el sur de la ciudad de Villa Mercedes, provincia de San Luis. En las últimas cuatro décadas su población aumentó

notoriamente lo que condujo a un importante crecimiento hacia el sur, modificando el uso del suelo e incorporando, dentro del área urbana, sectores del río Quinto, cambiando así su dinámica natural. Las crecientes de carácter extraordinario, como las ocurridas en los años 2000, 2001 y 2015 afectaron notoriamente las actividades socioeconómicas por lo que indagar sobre esta relación se considera importante.

El área de estudio se encuentra situada en el sector centro-este de la provincia de San Luis dentro del ejido municipal de Villa Mercedes (Figura 1).

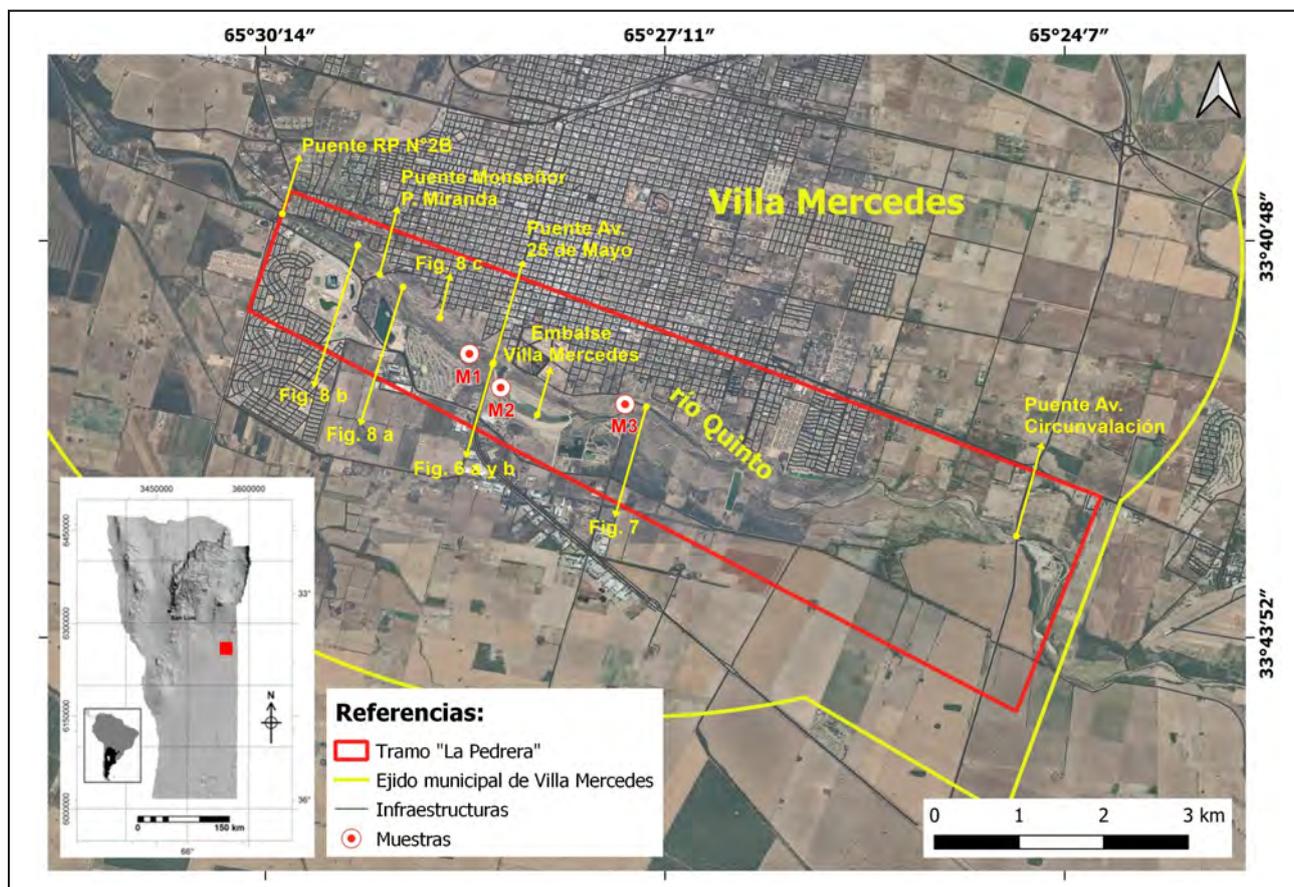


Figura 1. Mapa de la ubicación del área de estudio con puntos de observaciones de campo y muestras.

Los estudios geológicos-geomorfológicos de los ríos son de vital importancia para comprender los mecanismos y la dinámica de estos ambientes bajo el efecto de una presión antrópica cada vez más intensa. Son conocidas las contribuciones al conocimiento de los sistemas fluviales del sur de Córdoba y entre ellas se destacan los trabajos de Degiovanni et al. (2013), Degiovanni et al. (2017), Doffo et al. (2016) y Doffo et al. (2017) que abordaron aspectos geomorfológicos, morfodinámicos y ambientales del río Cuarto. El aporte científico de Ramonell y Amsler (2001) sobre la metamorfosis del río Quinto, estudios geomorfológicos y ambientales realizados en la cuenca de El Morro (Jobbágy et al. 2015) y las inferencias sobre las tendencias climáticas y los riesgos geomorfológicos asociados realizado por Ojeda y Sosa (2009) son algunas de las principales investigaciones de los sectores aledaños al área de estudio. En este sentido, la presente contribución plantea un aporte para el campo de la geomorfología fluvial debido a la falta de investigaciones de los ríos de la provincia de San Luis y se ofrece como un instrumento de consulta para establecer las condiciones del espacio fluvial urbano en Villa Mercedes.

El área de estudio geológicamente se inserta dentro del ambiente de la Llanura Chaco-Pampeana, inmediatamente al sur del límite aproximado con el de las Sierras Pampeanas de San Luis y Córdoba. La zona se caracteriza por presentar relieves de edad cuaternaria destacando la ausencia de basamento cristalino aflorante. Como lo sostienen Costa et al. (2005) la acción eólica es el principal proceso involucrado en la modelación de geoformas en las áreas de planicies aledañas al valle del río Quinto, con participación fluvial subordinada. Las unidades morfoestratigráficas presentes resultan de la superposición e interdigitación de procesos fluviales y eólicos que dieron lugar a geoformas mayormente agradacionales. El clima de la región es templado, semiárido con régimen monzónico y torrencial de precipitaciones. La zona de estudio se ubica entre las isohietas de 500 y 600 mm con una evapotranspiración potencial media anual de 840 mm (Red de Estaciones Meteorológicas, 2022).

## Materiales y métodos

Para el análisis multitemporal se emplearon fotografías aéreas a escala 1:20000 e imágenes satelitales de alta resolución espacial del sistema Google Earth© para los años 1975, 2003 y 2020. A partir de estos y mediante un abordaje histórico y evolutivo del canal, se obtuvo el grado y carácter de la sinuosidad (P) utilizando los criterios de Friend y Sinha (1993) basados en Schumm (1963) y se identificaron los procesos morfodinámicos (erosión, desborde y sedimentación) a partir de las técnicas tradicionales de fotointerpretación, útiles para entender la movilidad horizontal y sus efectos.

La caracterización geomorfológica del río Quinto se realizó bajo un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica) con el propósito de establecer las relaciones espaciales entre los diferentes elementos analizados y a partir de las cuales se realizaron inferencias sobre las interacciones entre los componentes del medio físico y antrópico. Para ello, se utilizó el Modelo Digital de Elevación MDE-Ar v2.0 con resolución espacial de 30 m y una precisión vertical de aproximadamente 2 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Por medio del software QGIS 3.14 y el complemento QPROF se construyó el perfil longitudinal del canal y se analizaron las variaciones de la altura (referida al nivel medio del mar) y la pendiente en función de la distancia y se obtuvo el índice de concavidad (IC) de Langbein (1964), necesarios para identificar los sectores con condiciones favorables para la movilidad vertical del

sistema fluvial en el tramo de estudio. Además, se utilizaron datos parciales de la memoria técnica del cálculo hidráulico de la línea de ribera para diferentes caudales del sector del río realizado por Aeromapa S.A. (2002). El estudio de impacto ambiental (EIA) del embalse Villa Mercedes no pudo ser considerado por no encontrarse disponible para su consulta.

Por último, se efectuó el muestreo sedimentológico de la carga de fondo (barras y fondo de canal) para conocer la variación de los parámetros texturales con la finalidad de determinar la proporción de sedimentos que ingresa al embalse y que provocan la pérdida de la capacidad hidráulica. Los datos de granulometría (peso retenido por tamiz) pertenecientes a las muestras de sedimentos, se registraron en el programa GRADISTAT 8.0 (Blott y Pye, 2001). Para cada muestra se estableció el análisis de sus variables estadísticas utilizando la clasificación granulométrica de Udden-Wentworth (1922) y el método de Folk y Ward (1957).

## Resultados

El tramo de estudio del río Quinto denominado en este trabajo "La Pedrera" se dispone con orientación NO-SE y muestra un marcado control estructural que produce cambios en su orientación y en el diseño del cauce. Al analizar el grado y carácter de la sinuosidad, el tramo presentaba en el año 1975 un canal simple y rectilíneo ( $P=1,15$ ), el cual cambió a un canal transicional en el año 2003 ( $P=1,26$ ) con sectores entrelazados y para el año 2020, mostraba un aumento de la sinuosidad con  $P=1,32$ . Además, se obtuvo un perfil longitudinal cóncavo ( $IC=1,05$ ), con una pendiente general de 0,8% y un desnivel de 42,74 m en 14,96 km de recorrido. Se destaca la presencia de tramos con valores altos de la pendiente entre los 2° y 4,5° (Figura 2).

Para una mejor descripción se realizó una segmentación del tramo "La Pedrera" dado que presenta distintas características (Figura 2). El "segmento A" es el que atraviesa el entorno urbano de la ciudad de Villa Mercedes. Posee un canal recto y desarrolla en sus primeros 2000 m un ancho de canal de 12 m al encontrarse encajado en las sedimentitas consolidadas de la Fm. Río Quinto. El valle fluvial tiene forma de "V" con anchos variables entre 80 m y 150 m, sus laderas presentan pendientes moderadas (entre 10 y 15%) con profundidades medias de 10 m y en algunos sectores muestra hasta 3 niveles de terrazas. Al continuar su recorrido, aguas abajo del puente Monseñor P. Miranda, la influencia antrópica se hace más evidente hasta superar la posición del embalse Villa Mercedes (Figura 3), donde la sinuosidad es progresivamente mayor y el ancho de canal es de unos 20 m aproximadamente y solo se observan algunos elementos residuales de terrazas indiferenciadas.

Es en este segmento que la sedimentación se ve favorecida por la disminución de la pendiente del canal y el ensanchamiento del cauce, la cual es potenciada por la presencia de 3 azudes. Esto ha provocado, por un lado, el aumento de barras centrales y el cambio de patrón del canal desde rectilíneo a entrelazado entre los años 1975 y 2003 (Figura 3 a y b) pero también la reducción de la pendiente longitudinal del canal y su capacidad de almacenamiento por colmatación del reservorio, como se muestra en la imagen satelital del año 2020 (Figura 3 c).

Por otra parte, el "segmento B" posee un canal sinuoso, lateralmente poco encajado, con un ancho promedio de 60 m y desarrollo de meandros que atraviesan un entorno rural. Presenta un valle en artesa de fondo amplio y plano, con un ancho variable que oscila entre 200 m y 1500 m, sus laderas

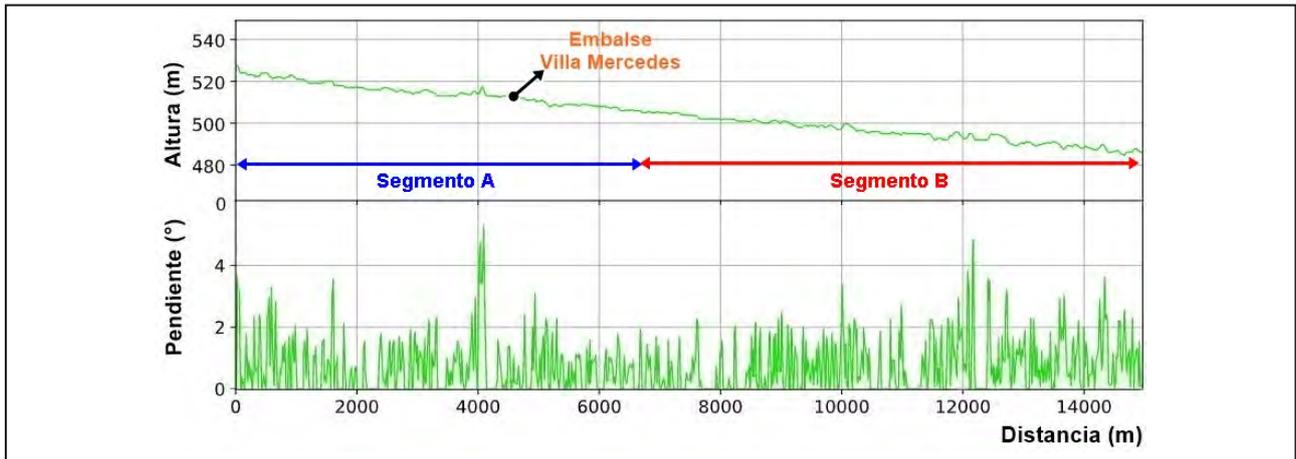


Figura 2. Perfil longitudinal del río Quinto en el tramo "La Pedrera" donde se indica la posición del Embalse Villa Mercedes y la de los segmentos A y B.

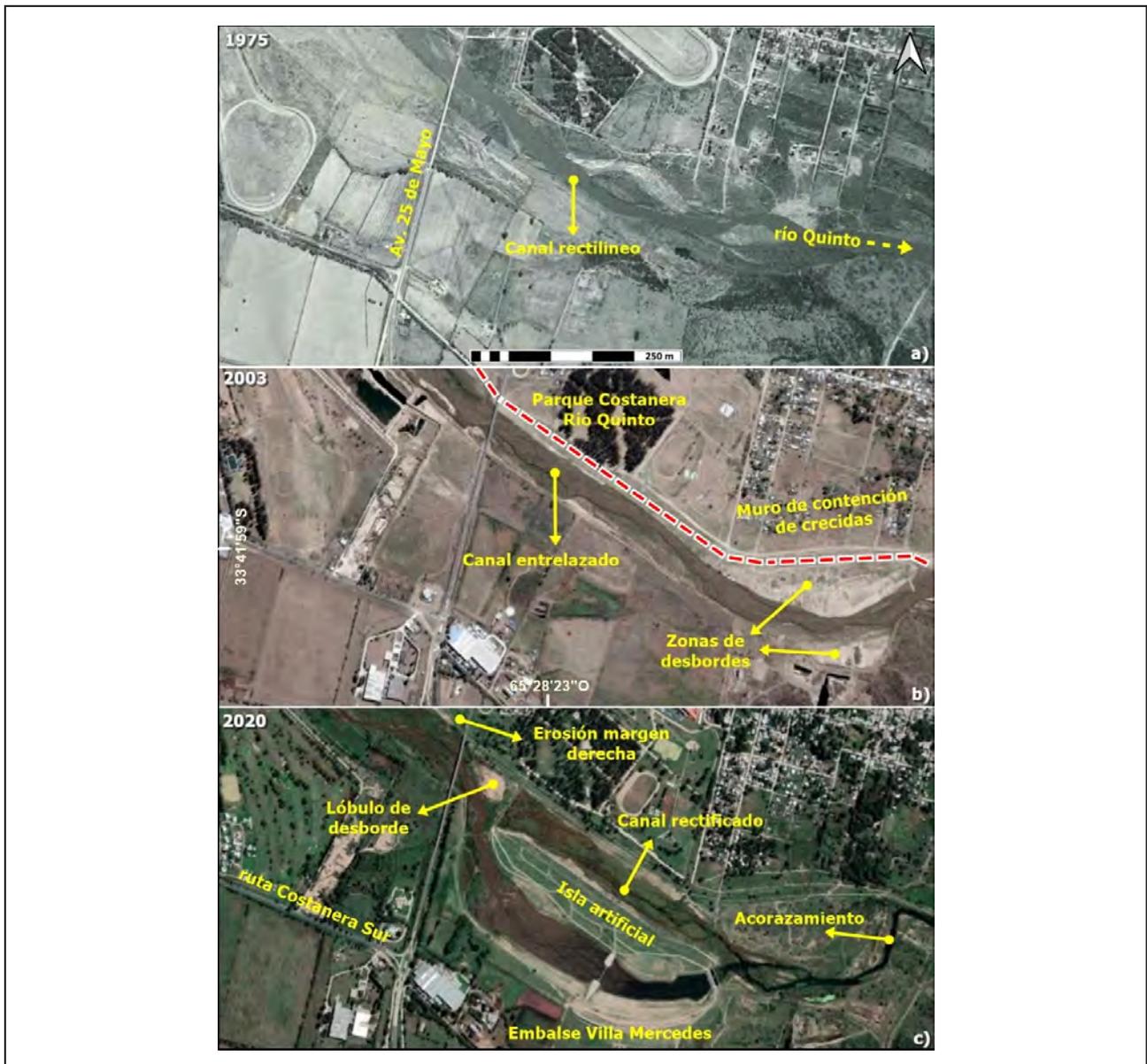


Figura 3. Cambios morfodinámicos identificados entre los años 1975 y 2020 en la zona del embalse Villa Mercedes. En las figuras b y c se muestran las intervenciones antrópicas y sus efectos.

muestran pendientes suaves (entre 5 y 10%), aunque por sectores desarrolla taludes prácticamente verticales (entre 2 y 4 m de altura) y 2 niveles de terrazas bien definidas.

El estudio granulométrico señala que la barra ubicada aguas arriba del puente de la Av. 25 de Mayo (M1-B) (ver ubicación de las muestras en la Figura 1) se clasifica como arena media moderadamente seleccionada con un 3,2% de grava y 96,4% de arena (Figura 4). Mientras que aguas abajo del azud 2, la muestra sobre el delta desarrollado en el lago (M2-D), se clasifica como arena muy gruesa pobremente seleccionada compuesta por 35% de grava y 63,8% de arena. En la muestra M3-B aguas abajo del azud 3, la barra de este sector presenta una grava muy fina pobremente seleccionada compuesta por 75,6% de grava y 24,7% de arena. Al estudiar la variabilidad de los sedimentos del fondo del canal resultan notorias las diferencias entre las muestras M1-C y M3-C donde el porcentaje de gravas se incrementa en un 17,3% desde grava muy fina a grava media. Estos cambios significativos en el tamaño de los sedimentos sugieren la disminución en la competencia del flujo que cambia a causa del efecto que impone el embalse sobre el río.

Los resultados que se obtuvieron permiten considerar que la transición en la relación arena-grava es la respuesta del sistema fluvial a los cambios energéticos que modifican la capacidad de transporte bajo la presencia de los azudes, provocando la sedimentación y la posterior colmatación del embalse con arena muy gruesa, perdiendo la función original para la cual se construyó.

El embalse Villa Mercedes tiene una superficie de 19 ha, una capacidad de 0,42 hm<sup>3</sup> y consta de tres azudes, dos ubicados aguas arriba que promueven la circulación de agua por el reservorio y permiten la continuación del escurrimiento superficial y de las crecidas por el canal rectificado de unos 1000 m de largo por 200 m de ancho (Figura 5 a), mientras que el tercer azud presenta un resalto topográfico de 3 m aproximadamente y funciona como nivelador del espejo de agua vertiendo nuevamente el agua al río Quinto. Posee 3 playas y una isla artificial construidas con parte del material extraído de la profundización del cauce natural. La construcción inaugurada a fines del año 2015 presenta una doble función,

la primera es generar un atractivo turístico para visitantes y ciudadanos de Villa Mercedes que tienen al río como el principal espacio de esparcimiento y por otro, contribuir a controlar el efecto de las inundaciones.

Las observaciones de campo permiten sostener que la presencia de la infraestructura hidráulica permite que la vegetación fije las barras del canal rectificado aguas abajo del azud 1, modificando las condiciones morfodinámicas naturales de ese sector. Además, promueve los procesos de sedimentación en el azud 2 a través de capas de sedimentos depositadas en los eventos de crecida que traslapan sucesivamente y progredan hacia el interior del reservorio formando un delta (Figura 5 b, c y d) y este sector requiere ser dragado frecuentemente (Figura 6 b). Al mismo tiempo, esta situación favorece a la extracción de áridos del cauce del río Quinto aguas arriba del azud 2 como medida de protección de las márgenes y la estabilidad de las estructuras civiles (Figura 6 a).

Hacia aguas abajo del embalse, el proceso de erosión de márgenes y del fondo del río Quinto se acelera como respuesta a la presencia del tercer azud del lago el cual retiene gran parte de los sedimentos transportados por la corriente, produciendo un déficit local de la carga sedimentaria y un incremento de la erosión neta del lecho aguas abajo. En este tramo, el material grueso se acomoda de tal forma que reviste al material fino y lentamente lo va cubriendo, formando una coraza, la cual promueve a que el transporte de sedimentos disminuya llegando a una condición de estabilidad. El fuerte acorazamiento del cauce en este sector se compone de gravas medianas a gruesas con tamaño máximo de clasto de 64 mm (Figura 7).

Así mismo, la presión antrópica que se observa en el tramo "La Pedrera" ha provocado un desequilibrio del sistema acelerando procesos de erosión puntual. Algunos ejemplos se pueden situar en el "Segmento A" en zonas de erosión en curvas que inciden sobre obras civiles ubicadas en la margen izquierda del río, en los sectores próximos al puente Monseñor P. Miranda donde se evidencian procesos de socavación, descalce en la base y desplome (Figura 8 a y b) además de canteras no autorizadas para la extracción de áridos dispuestas aguas arriba del puente de la Avenida 25 de Mayo (Figura 8 c).

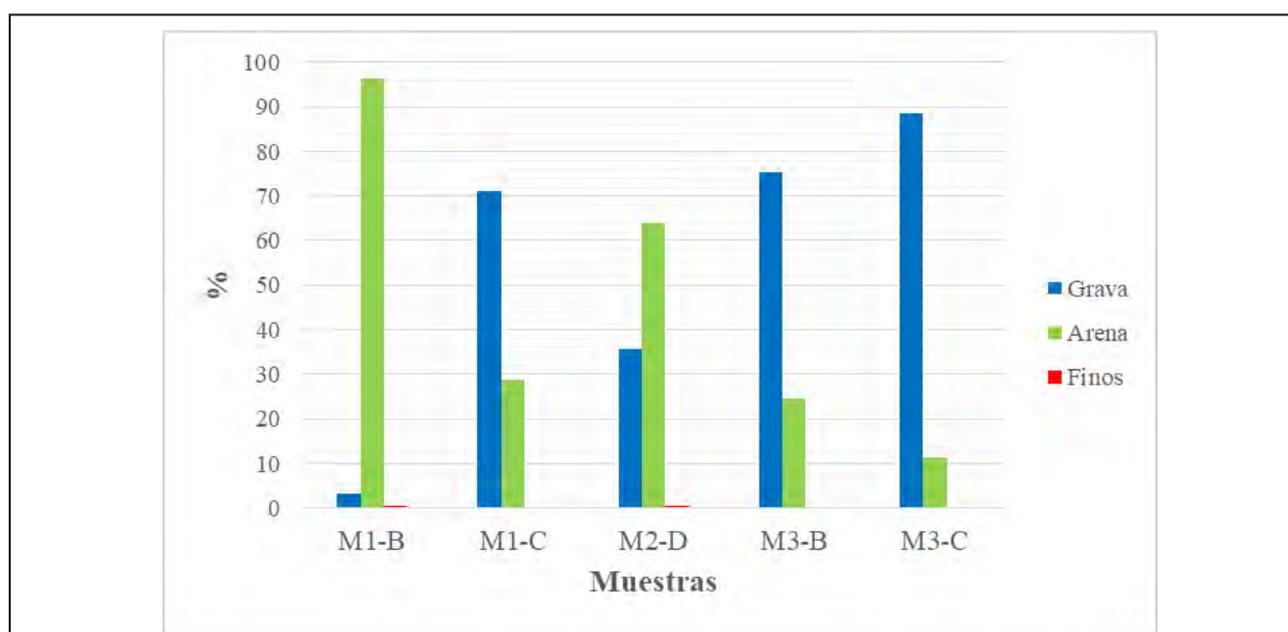


Figura 4. Análisis de la distribución granulométrica de las muestras.



Figura 5. Evolución multitemporal de la colmatación del embalse y de la formación del delta. a) Vista aérea año 2019. b) Año 2016. c) Año 2018. d) Año 2020.



Figura 6. a) Extracción de áridos (octubre 2019). b) Dragado del embalse (julio 2018).

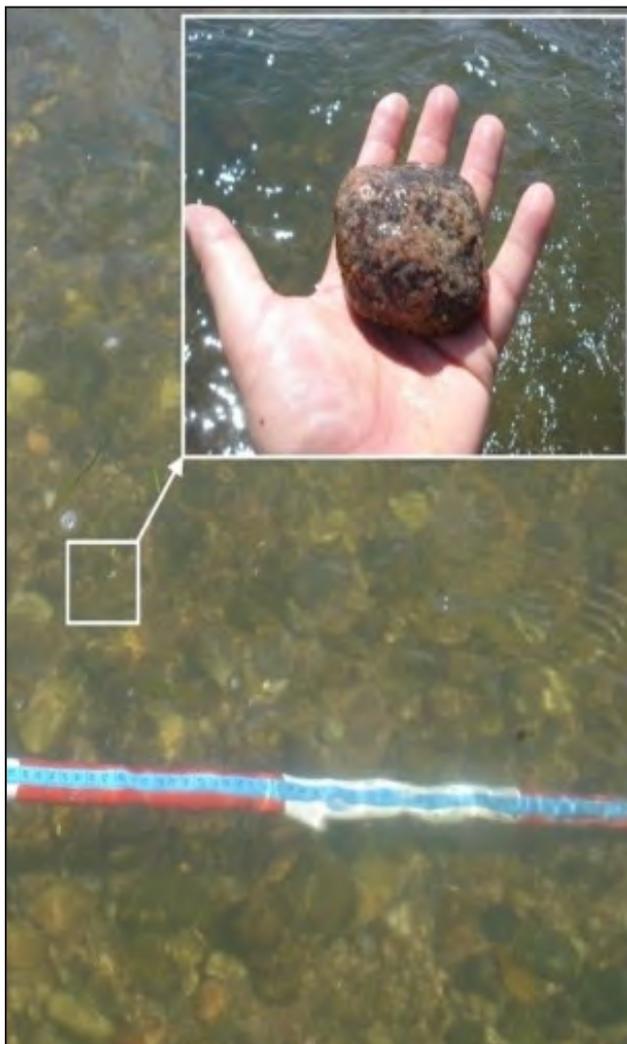


Figura 7. Detalle del acorazamiento del lecho ( $33^{\circ}42'4.37''S$   $65^{\circ}27'29.45''O$ ).

## Conclusiones

A partir de las observaciones realizadas en gabinete y el control de campo se considera que los procesos erosivos y sedimentarios derivados de la dinámica fluvial del río Quinto son fuertemente potenciados por la acción antrópica, particularmente en los sectores aledaños al recientemente creado embalse Villa Mercedes.

El perfil longitudinal del río Quinto en el tramo denominado "La Pedrera" es suavemente cóncavo, propenso a la sedimentación y cuya condición tiende al equilibrio del sistema.

El embalse actúa como nuevo nivel de base local, modificando la condición de equilibrio, provocando aguas arriba erosión retrocedente y una nueva condición de sedimentación.

A partir de la instalación de los azudes en el año 2015, el contenido de arenas depositado originó la formación de un delta que es dragado con frecuencia para mantener la funcionalidad del cuerpo de agua.

En la salida del cierre del embalse (azud 3), se ha activado la erosión del fondo del canal inducido por el incremento de la energía del sistema, lo que conduce al transporte de los materiales más finos dejando un lecho compuesto por grava, provocando el acorazamiento en este tramo.

El sector del río Quinto analizado ha tenido importantes variaciones morfodinámicas durante el lapso temporal 1975 a 2020, con notables cambios producidos por procesos activos de la dinámica fluvial. El índice de sinuosidad se incrementó paulatinamente hasta 2020 (de 1,15 a 1,32) lo que va en concordancia con el aumento de las precipitaciones evidenciado a partir de 1970 produciendo un mayor aporte de caudales líquidos y sólidos desde la cuenca hacia el cauce principal, impulsando los procesos erosivos y deposicionales.

Finalmente podemos afirmar que el control efectuado por las modificaciones antrópicas a procesos naturales en los últimos años ha generado situaciones críticas cuyos efectos se evidencian en la colmatación del embalse y la erosión de defensas en el sector bajo estudio.



Figura 8. a y b) Procesos erosivos en el muro de contención de crecidas ( $33^{\circ}41'2.93''S$   $65^{\circ}29'18.43''O$ ). c) Cantera de áridos ( $33^{\circ}41'38.07''S$   $65^{\circ}28'33.33''O$ ).

## Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Daniel Alejandro Dueñas, Graciela del Rosario Sosa y Guillermo Enrique Ojeda. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Daniel Alejandro Dueñas y todos los autores comentaron las versiones

anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

## Declaración de conflictos de intereses

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

## Referencias bibliográficas

- Memoria técnica del proyecto Estudio Hidrológico-Hidráulico de crecidas Río V en el tramo: Ruta Nacional N°7 - Villa Reynolds. (2002). Aeromapa S. A.
- Blott, S.J. y Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Costa, C., Ortiz Suárez, A., Miró, R., Chiesa, J., Ojeda, G., Gardini, G., Carugno Duran, A., Guerstein, P., Strasser E., Morla, P. y Tognelli, G. (2005). Hoja Geológica 3366-IV, Villa Mercedes, Provincias de San Luis y Córdoba. *Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 348*.
- Degiovanni, S., Doffo, N. y Echevarria, K. (2017). Aspectos geomorfológicos y morfodinámicos que controlan el peligro de inundación en La Carlota, Córdoba, Argentina. En *Actas 7: 20° Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán* (pp. 35-37).
- Degiovanni, S., Villegas, M. y Ulla, J. (2013). Análisis de la carga de fondo y dinámica de transporte en el río Cuarto, Córdoba, como base para una minería de áridos sustentable. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 70 (2), 238-348.
- Doffo, N., Degiovanni, S. y Andreazzini, J. (2017). Cambios morfohidrológicos por intervenciones humanas en el tramo inferior del río Cuarto y Bañados del Saladillo, Córdoba, Argentina. En *Actas 7: 20° Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán* (pp. 43-45).
- Doffo, N., Degiovanni, S., Echevarria, K. y Andreazzini, J. (2016). *Caracterización morfohidrológica del tramo inferior del río Cuarto y los Bañados del Saladillo y determinación de la peligrosidad de inundación de la localidad de La Carlota*. Informe técnico inédito. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Folk, R. y Ward, W. (1957). Brazos River Bara study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27, 3-27. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Friend, P. F., y Sinha, R. (1993). Braiding and meandering parameters. *Geological Society, London, Special Publications*, 75(1), 105-111. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.075.01.05>
- Instituto Geográfico Nacional. (2014). *Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina (MDE-Ar 2.0)*. <https://www.ign.gob.ar>
- Jobbágy, E. J., Nosetto, M. D., Bernasconi, H., Colazo, J. C., Galvan, M. J., Mercáu, J. L. y Alvarez, D. M. (2015). *Los nuevos cursos de agua en la cuenca del Morro: descripción del proceso y pautas para su gestión*. INTA San Luis.
- Langbein, W. B. (1964). Profiles of rivers of uniform discharge. *United States Geological Survey Professional Paper*, 501(B), 119-122.
- Ojeda, G. y Sosa, G. (2009). Tendencias climáticas y riesgos geomorfológicos asociados en la región central de la provincia de San Luis. En J.M. Sayago y M. Collantes (Eds.), *Geomorfología y cambio climático. Publicación especial 4* (pp. 47-61). Instituto de Geociencias y Medio Ambiente (INGEMA), Universidad Nacional de Tucumán.
- Ramonell, C. G. y Amsler, M. L. (2001). Metamorphosis processes (1992-2000) of the Quinto River, Argentina. En *Actas CD del 3º International Symposium Environmental Hydraulics, Phoenix*.
- Schumm, S. A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74(9), 1089-1100. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[1089:SOAROT\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[1089:SOAROT]2.0.CO;2)
- Red de Estaciones Meteorológicas (2022). *Red de Estaciones Meteorológicas de la provincia de San Luis*. <http://clima.edu.ar/>
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377-392.



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>  
Skidelsky Spahn, D.F., Villaverde, Á.G., Mastaglia, M.I., Ramírez R., Sato, R., Giménez, V. y Margasin, A.  
Regionalización de caudales máximos mediante técnicas estadísticas multivariadas en cuencas de la provincia de Entre Ríos  
e002, <https://doi.org/10.59069/24225703e002>

# Regionalización de caudales máximos mediante técnicas estadísticas multivariadas en cuencas de la provincia de Entre Ríos

## Regionalization of peak flow through multivariate statistical techniques in basins of the province of Entre Ríos

Diana Fernanda Skidelsky Spahn <sup>1</sup> ✉\* - Ángel Gabriel Villaverde <sup>1</sup> ✉ - María Inés Mastaglia <sup>1</sup> ✉  
 Roxana Ramírez <sup>1</sup> ✉ - Rodolfo Sato <sup>1</sup> ✉ - Vanesa Giménez <sup>1</sup> ✉ - Andrea Margasin <sup>1</sup> ✉

\* Autor de contacto

Recibido: 23 de octubre de 2022 • Aceptado: 13 de marzo de 2023 • Publicado: 21 de junio de 2023

### Resumen

La provincia de Entre Ríos tiene una gran cantidad de cuencas que alimentan la importante red hídrica que la caracteriza. La misma está integrada por diversos cauces que van desde pequeños arroyos hasta caudalosos ríos. Sin embargo, en la actualidad hay escasa información hidrométrica observada.

Para el proyecto de una obra hidráulica es imprescindible definir el caudal de diseño. En los cursos de agua donde no se dispone de estaciones de aforo, se debe recurrir a modelos hidrológicos para la estimación de caudales máximos, pero la precisión de sus resultados presentará incertidumbre si no se cuenta con datos de eventos observados para su calibración.

Una posibilidad para disminuir la incertidumbre en la estimación de caudales en cuencas no aforadas es recurrir a técnicas de regionalización. Dicho término se utiliza para denominar la transferencia de información de un sitio a otro dentro de un área de comportamiento hidrológico semejante (Tucci, 2002).

Este trabajo de regionalización de caudales máximos se basó en la aplicación de técnicas estadísticas de análisis multivariado que permitieron definir ecuaciones para determinar caudales en las distintas cuencas de la provincia de Entre Ríos. Para ello, se utilizó la información disponible de estaciones de aforo que contaban con registros de caudales medidos por más de veinte años. Además, se amplió la base de información incorporando caudales máximos de distintas subcuencas obtenidos mediante modelos hidrológicos calibrados pertenecientes a las cuencas del Arroyo Feliciano y del río Gualeguaychú.

A través de las técnicas mencionadas se determinaron, por un lado, regiones de cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas y, por otro lado, los parámetros físicos e hidrológicos que mejor correlacionaron con el caudal. Finalmente,

se desarrollaron ecuaciones que permiten estimar los caudales para distintas recurrencias para cada una de las regiones en función de tales parámetros.

**Palabras clave:** red hídrica, áreas hidrológicamente homogéneas, regionalización, estimación de caudales máximos.

1. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Paraná (E.R.), Universidad Tecnológica Nacional, República Argentina.

## Abstract

Entre Ríos province has many basins that nourish its characteristic water network. It is integrated by various channels from small streams to large flow rivers. However, at present, there is little observed hydrometric information.

For the design of a hydraulic structure, it is essential to define the design flow. In watercourses where gauging stations are not available, hydrological models must be used to estimate peak flows, but the accuracy of their results will be uncertain if there is no data on observed events for their calibration.

One possibility to reduce the uncertainty in flow estimation in ungauged basins is to resort to regionalization techniques. This term is used to describe the transfer of information from one site to another within an area of similar hydrological behavior. (Tucci, 2002).

This work of regionalization of peak flow was based on the application of statistical techniques of multivariate analysis that allow defining equations to determine flows in the different basins of the province of Entre Ríos. This work was based on the application of regionalization and multiple correlation techniques that allow defining equations to determine flows in the different courses of the province of Entre Ríos. For this purpose, the information available from gauging stations that had flow records measured for more than twenty years was used. In addition, the information base was expanded by incorporating maximum flows from different sub-basins obtained through calibrated hydrological models belonging to the Feliciano stream and Gualaguaychú river basins.

Using the aforementioned techniques, first, hydrologically homogeneous basin and sub-basin regions were determined, and then the physical and hydrological parameters that best correlated with flow. Finally, equations were developed to estimate flow rates for different recurrences for each of the regions as a function of these parameters.

**Keywords:** water network, hydrologically homogeneous areas, regionalization, estimation of peak flows.

## Introducción

La provincia de Entre Ríos, como su nombre indica, se encuentra delimitada por ríos que dan forma a sus límites geográficos y políticos. Las fronteras se conforman al Norte por los ríos Guayquiraró y Mocoetá junto con los arroyos Basualdo y las Tunas, al Oeste y al Sur la rodea el río Paraná y al Este el río Uruguay. A su vez, los distintos ríos y arroyos extendidos a lo largo y ancho de la provincia conforman una vasta red hídrica.

El conocimiento del régimen de un curso de agua y sus caudales es fundamental para poder dimensionar obras en donde prime la seguridad, eficiencia y economía. En una provincia con una red de drenaje tan extensa, la medición de caudales en distintos puntos de interés mediante estaciones de aforo es una tarea muy compleja que supone una gran inversión en recursos y tiempo. En la actualidad la provincia cuenta con escasos puntos de aforo y, solo una parte de estas mediciones pueden ser utilizados como base de datos.

La problemática planteada motivó a realizar esta investigación, en la que se aplica la técnica de regionalización para determinar ecuaciones que permitan estimar valores de caudales máximos para distintas recurrencias en función de parámetros de fácil determinación. Para ello se utilizaron técnicas de estadística multivariada que permiten determinar las variables más significativas que tienen una mayor influencia en relación con los valores del caudal máximo.

## Área de estudio

En la Figura 1 se presentan las cuencas principales de la provincia.

Para el abordaje de la investigación se estudiaron aquellas cuencas que poseen estaciones de aforo de caudal con registros de mediciones mayores a veinte años según la base de datos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH). En la Tabla 1 se presentan las seis cuencas que cumplían con el requisito.

**Tabla 1. Cantidad de años con mediciones según la estación de aforo en cada cuenca**

Cuenca	Estación	Ubicación	Años de medición
Gualeguay	3004	Rosario del Tala	28
Nogoyá	3037	RP N011	36
Yuquerí Grande	3061	Concordia	23
Feliciano	3003	Paso Medina	44
Guayquiraró	3808	Paso Junque	37
Gualeguaychú	3030	RP N39	31

Como la cantidad de cuencas con estaciones de aforo resultaron insuficientes para la determinación de áreas homogéneas y la aplicación de los métodos estadísticos elegidos para este estudio, se decidió adicionar datos de dieciséis sub-cuencas del arroyo Feliciano y dieciocho del río Gualeguaychú, analizadas a través de modelos hidrológicos calibrados presentado en los proyectos finales de grado *Bidegorry et al. (2021)* y de *Grilli et al. (2021)*.

## Caracterización de las cuencas y subcuencas

La técnica de regionalización de caudales requiere dos aspectos fundamentales para poder ser aplicada: cantidad y calidad de los datos. En este estudio se necesitó obtener de cada cuenca y subcuenca sus parámetros físicos e hidrológicos, los cuales formaron parte de las variables analizadas con las técnicas estadísticas.

Los parámetros físicos son aquellos que se corresponden con la morfología de la cuenca, en cambio, los parámetros hidrológicos son aquellos que responden a los procesos hidrológicos que se producen en la cuenca.

Para la determinación de los parámetros físicos de la Tabla 2 se trabajó con un sistema de información geográfica a partir del software QGIS (*QGIS Development Team, 2019*).

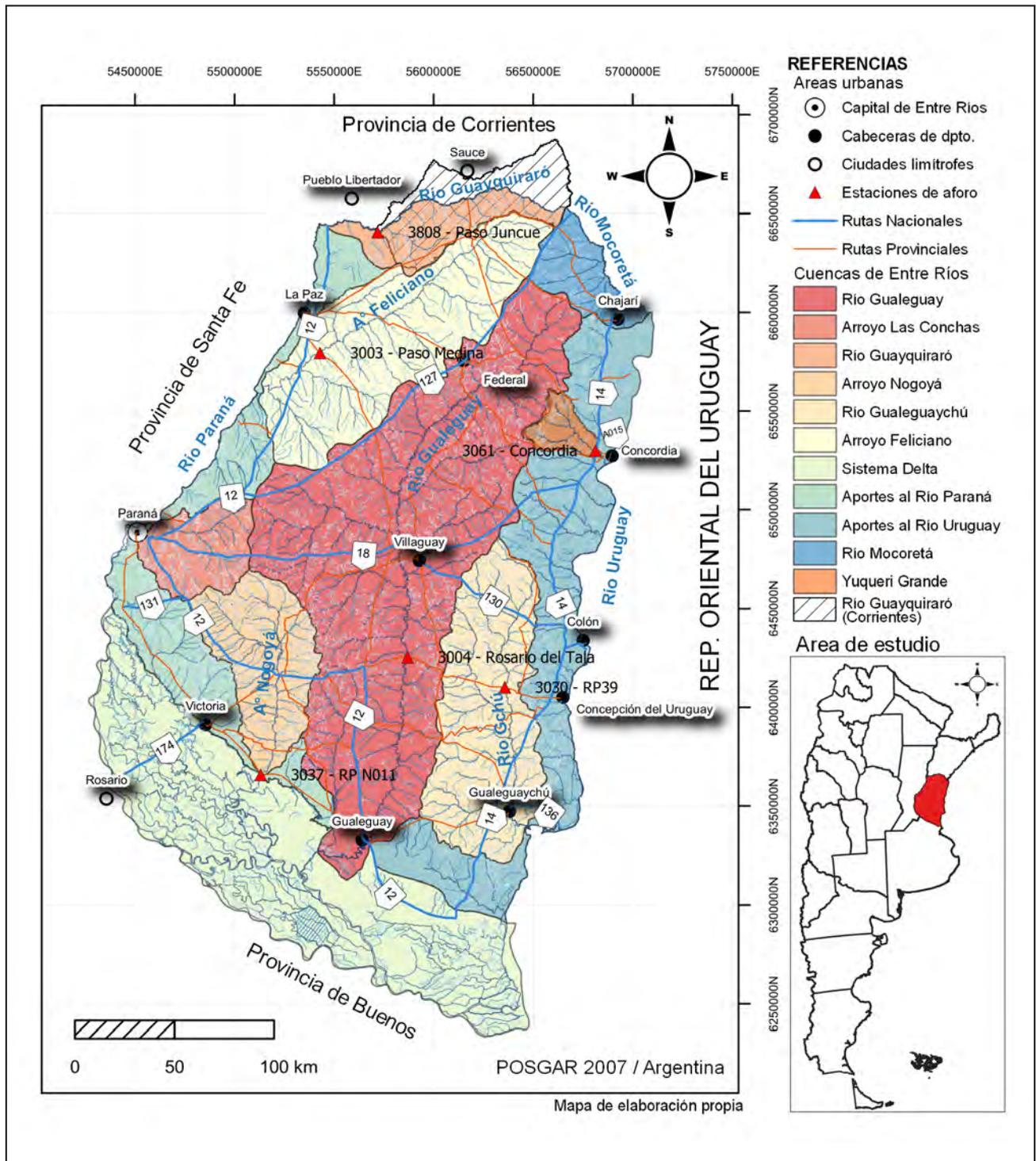


Figura 1. Mapa de la ubicación del área de estudio con puntos de observaciones de campo y muestreos.

Para ello, se utilizaron los Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) con un tamaño de grilla de 30 metros, a partir de los cuales se delimitaron cuencas y se obtuvieron los parámetros físicos de la Tabla 3. Los parámetros físicos de las subcuencas del estudio se tomaron de los proyectos mencionados anteriormente.

Se consideraron el caudal máximo y la precipitación media areal como parámetros hidrológicos para analizar el comportamiento de las cuencas en estudio.

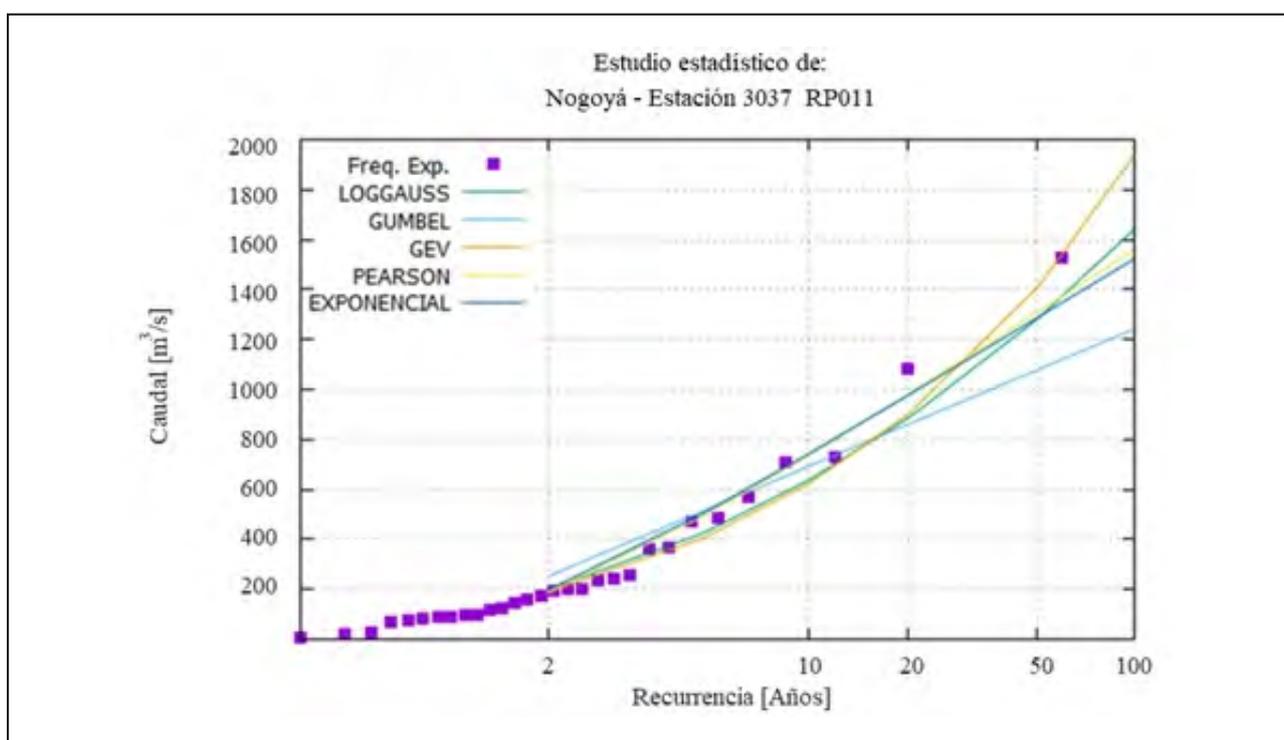
Con relación al primer parámetro hidrológico mencionado, se generó una serie de caudales máximos anuales para cada cuenca aforada. Para ello, se analizaron los datos de Caudal Instantáneo Máximo y Caudal Máximo Medio Diario proporcionados por el registro de mediciones del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH), para el año hidrológico septiembre-agosto. A modo de ejemplo, la Tabla 4 presenta la serie de caudales máximos anuales del arroyo Nogoyá, con estación de aforo en la ruta provincial N° 11 (Estación 3037 del SNIH).

**Tabla 2. Parámetros físicos de la cuenca**

Variable	Descripción	Unidad	Método de obtención
A	Área de la cuenca	km <sup>2</sup>	Software QGis
P	Perímetro de la cuenca	km	Software QGis
Kc	Coficiente de compacidad	-	Fórmula de Gravelius (1914)
Lc	Longitud del curso principal	km	Software QGis
i	Pendiente media del curso principal	m/m	Software QGis
Tc	Tiempo de Concentración	h	Fórmula de Graf (1982)
R	Coficiente de almacenamiento	h	Fórmula de Graf (1982)
Lambda	Coficiente Lambda	-	Relación de parámetros del hidrograma unitario de Clark

**Tabla 3. Parámetros físicos obtenidos para las cuencas aforadas**

	Gualeguay	Nogoyá	Yuquerí Grande	Feliciano	Guayquiraró	Gualeguaychú
A [km <sup>2</sup> ]	16.038,1	3.873,2	677,3	5.572,7	3.073,8	2.028,7
P [km]	1.350,4	523,5	214,4	732,0	557,6	420,0
Kc	3,01	2,36	2,32	2,75	2,84	2,63
Lc [km]	495,7	137,0	50,7	151,5	129,5	113,5
i [m/m]	0,00009	0,00052	0,00117	0,00024	0,00036	0,00042
Tc [h]	266,2	62,6	22,6	78,4	63,6	55,2
R [h]	213,2	33,6	12,6	63,4	43,9	37,3
Lamda	0,44	0,35	0,36	0,45	0,41	0,40



**Figura 2. Gráfico de frecuencias experimentales.**

**Tabla 4. Serie de caudales máximos anuales del arroyo Nogoyá - Estación 3037**

Año Hidrológico	Caudal máximo anual (m <sup>3</sup> /s)
1984	75,71
1985	25,35
1986	100,01
1987	19,9
1988	10,6
1989	256,3
1990	369
1991	Sin datos
1992	93,4
1993	731,65
1994	72,53
1995	98,7
1996	Sin datos
1997	Sin datos
1998	115,9
1999	1080,2
2000	708
2001	201,5
2002	157,4
2003	242,1
2004	194,2
2005	172
2006	Sin datos
2007	91,4
2008	236,8
2009	Sin datos
2010	144,5
2011	200,7
2012	572,6
2013	360,8
2014	471,1
2015	Sin datos
2016	1524,9
2017	122,8
2018	489,8
2019	81,4

Los caudales máximos de las subcuencas no aforadas pertenecientes al arroyo Feliciano y río Gualeguaychú se obtuvieron de los resultados de los modelos hidrológicos desarrollados y calibrados en el sistema de modelación HEC HMS presentados en los proyectos nombrados.

Sobre las series de caudales máximos conformadas se realizaron análisis de frecuencia aplicando el software AFMulti (*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la UNL, 2017*), el cual permitió estimar los valores de caudales máximos para las recurrencias de interés aplicando funciones de distribución de frecuencias adoptadas a partir de un análisis de bondad de ajuste y ajuste visual. Las recurrencias analizadas fueron 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Se utilizaron estos valores por ser las recurrencias adoptadas frecuentemente en el diseño y verificación de obras hidráulicas.

Las funciones de distribución analizadas fueron: Loggauss, Gev, Pearson, Gumbel y Exponencial. El software devuelve resultados numéricos y gráficos donde se observa las aproximaciones de las funciones para la variable estudiada y la bondad de ajuste, según el cálculo de errores que realiza. A modo de ejemplo, en la Figura 2 y Tabla 5, se presentan los resultados del software AfMulti para la cuenca del arroyo Nogoyá y se somborean los resultados para la función de distribución adoptada.

Con respecto a la metodología para obtener los valores de precipitación media areal se utilizó la Ecuación (1) para las diferentes cuencas y subcuencas.

$$PMA [mm] = I \left[ \frac{mm}{h} \right] * d[h] \quad \text{Ecuación (1)}$$

Siendo: PMA: Precipitación Media Areal; I: intensidad de la tormenta; d: duración de la tormenta adoptada.

El valor de intensidad de la tormenta se calculó utilizando las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) presentadas en *López et al. (2020)*. Para la determinación de la duración de la tormenta (d) se contrastaron los caudales obtenidos por modelación para precipitaciones de distintas duraciones con los caudales resultantes del análisis de frecuencia de valores observados. Se determinó que el mejor ajuste se obtenía para precipitaciones con una duración de dos a tres veces el tiempo de concentración.

### Análisis de correlación de las variables

El análisis se realizó con el software RStudio (*RStudio Team, 2020*) aplicando distintos métodos de valoración estadística para determinar aquellas variables que tenían mayor correlación e incidencia en el comportamiento del caudal máximo. Se ingresaron al software los valores estandarizados o normalizados de las variables físicas e hidrológicas determinadas anteriormente para una recurrencia de 5 años.

Para evaluar la correlación entre las variables se utilizó la Matriz de Correlación con el método de Pearson (Figura 3) el cual devuelve una matriz con valores que varían desde -1 a 1, indicando para un valor de cero una correlación nula y para un valor cercano a la unidad, una excelente correlación; pudiendo ser positiva o negativa.

Se tomó como referencia que los valores superiores al valor absoluto 0,70 indicaban las mejores correlaciones, lo cual significaba un efecto grande entre variables (*Cohen, 1988*). Se verificó en el software que el nivel de significancia p obtenido del análisis sea menor a 0,05 para un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 5. Caudales máximos para distintas recurrencias. Arroyo Nogoyá - Estación 3037 Ruta Provincial N° 11.**

RECURRENCIA [Años]	CAUDAL [m³/s]					
	LOGGAUSS	GUMBEL	GEV	PEARSON	EXPONENC.	
100	1.640,20	1.242,00	1.242,00	1.936,30	1.558,10	1.522,40
50	1.281,40	1.078,60	1.078,60	1.407,00	1.308,20	1.287,50
20	884,9	860,6	860,6	900,5	980,5	977
10	636,9	692,2	692,2	622,6	735,5	742,1
5	427,6	516,6	516,6	408,5	494,5	507,2
2	199,6	251,4	251,4	187,9	188,5	196,7

A partir de este método se pudo determinar que las variables que mejor correlacionaron con el caudal máximo fueron: el área (A), la longitud del cauce (Lc), la pendiente (i), el tiempo de concentración (Tc), el coeficiente de almacenamiento (R) y la Precipitación Media Areal (PMA), lo cual puede observarse en el diagrama de correlación de variables presentado en la Figura 3.

El análisis se complementó con el método de componentes principales (PCA), el cual permite plantear la combinación entre las variables logrando reducir la dimensión de problema para una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

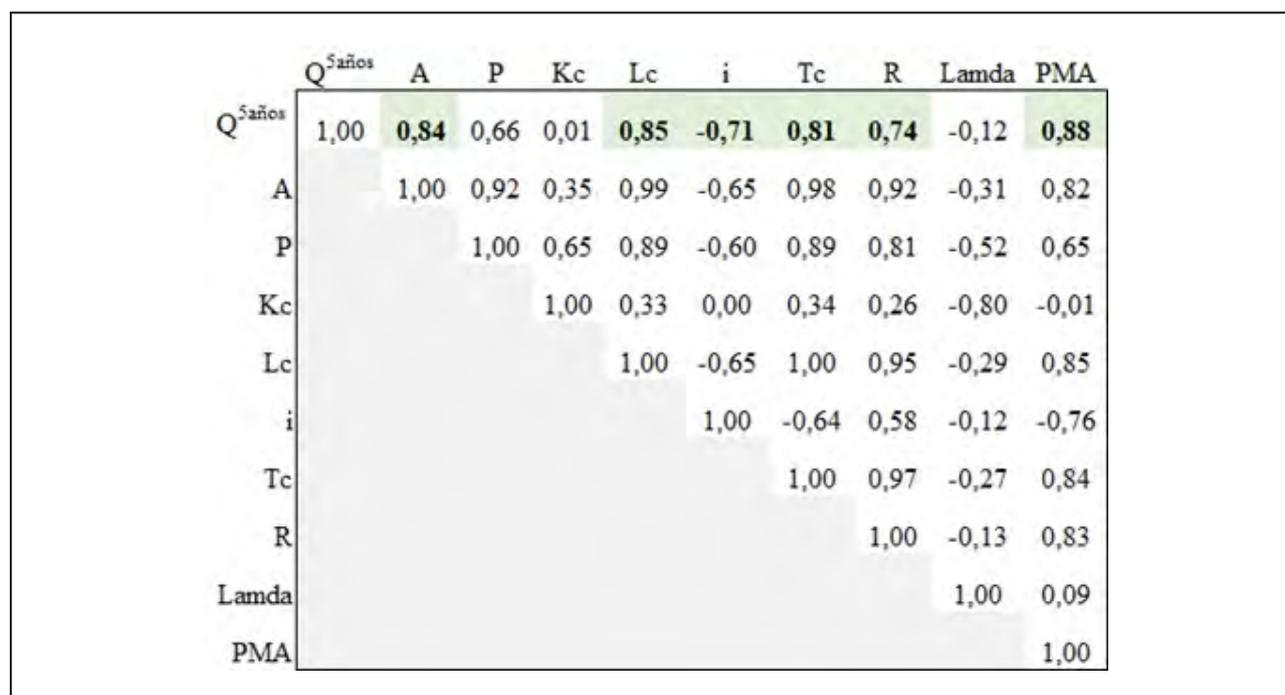
Este método grafica las variables en un par de ejes "X" e "Y" en forma de vectores, en donde se logra explicar la variabilidad total del modelo. En la Figura 4 se observa la interacción entre las variables que se representan con vectores que identifican a cada variable en estudio. En este gráfico se representa a la variable Caudal máximo para 5 años de recurrencia Q5.

A través de este método se analizaron las características del conjunto de variables en estudio, pudiendo visualizar la

información más importante. Por ejemplo, las variables similares al caudal máximo para 5 años de recurrencia (Q5), las cuales son: la PMA, el área (A), el perímetro (P), la longitud del cauce (Lc), el tiempo de concentración (Tc) y el coeficiente de almacenamiento (R).

El tercer método de análisis aplicado fue el Análisis Cluster, a partir del cual se identificaron los grupos más significativos, es decir aquellos que comparten características similares. La forma gráfica de presentar este método es mediante un diagrama de árbol o Dendrograma (Figura 5), donde las variables se agrupan en función de la similitud que existe entre ellas.

En la Figura 5 se puede observar cuatro grupos bien definidos, en donde el caudal máximo para 5 años de recurrencia (Q5) se asemejaba en mayor medida con la PMA, el perímetro (P), el coeficiente de almacenamiento (R), el área (A), la longitud del cauce (Lc) y el tiempo de concentración (Tc). Además, se observa que las variables atípicas dentro del conjunto de datos, que carecen de significatividad en este modelo son el coeficiente Lambda, la pendiente (i) y el coeficiente de compacidad (Kc).



**Figura 3. Diagrama de correlación de variables aplicado para 5 años de recurrencia.**

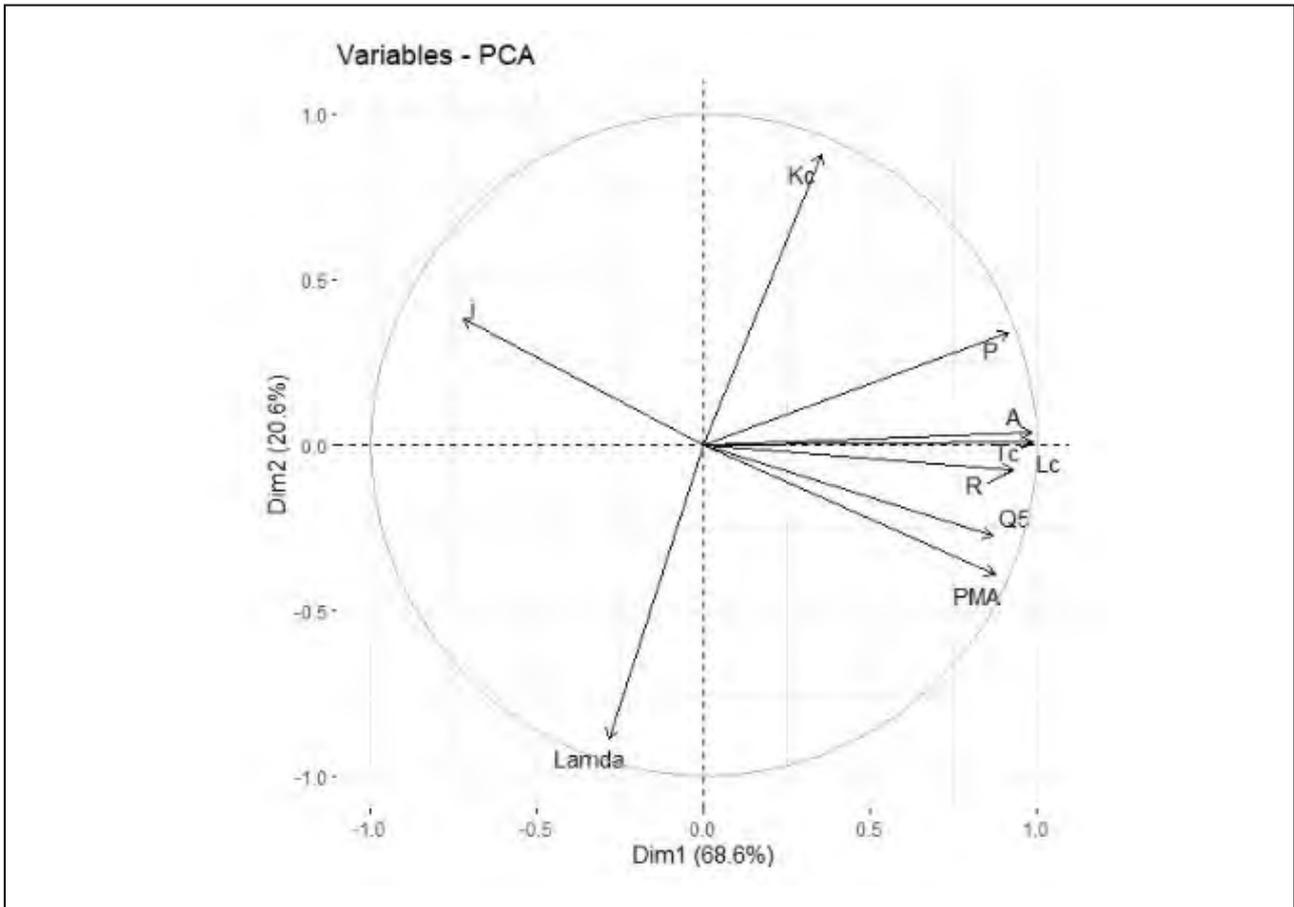


Figura 4. Método de componentes principales aplicado para 5 años de recurrencia.

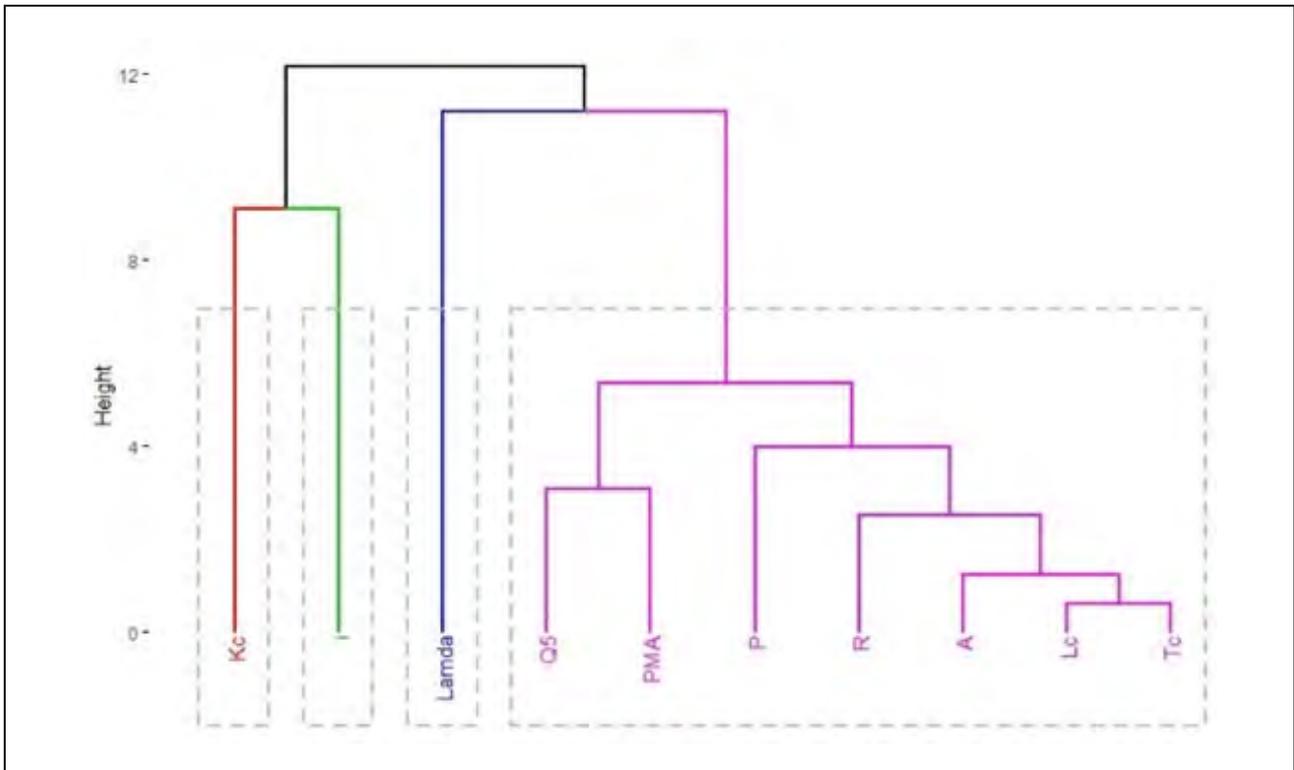


Figura 5. Dendrograma de variables aplicado para 5 años de recurrencia..

A partir de los resultados obtenidos de este estudio, se seleccionaron las variables que mejor se relacionan con el caudal máximo; para lo cual se tuvo en cuenta el análisis de los coeficientes de correlación de la matriz homónima del caudal máximo con las demás variables.

En virtud de seleccionar las variables que permiten conformar las ecuaciones de interés, se optó por un criterio primordial, el cual se basó en que las variables adoptadas puedan determinarse de manera directa. Finalmente, las variables seleccionadas ordenadas en función de su mayor correlación con el caudal máximo fueron:

- Precipitación Media Areal
- Área
- Pendiente media del curso principal

### Regionalización de cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas

Con las tres variables y los valores de caudal máximo para 5 años de recurrencia se procedió a realizar el agrupamiento de las cuencas y subcuencas en regiones homogéneas mediante un análisis de clúster de las variables, realizado con RStudio y se contrastaron los resultados obtenidos, con los gráficos de las Curvas de Andrews (Andrews, 1972).

Con el análisis de clúster se obtuvo el gráfico en el cual a través de la representación en un Dendrograma se observó la formación de cinco grupos de cuencas y subcuencas que presentaban características hidrológicamente homogéneas (Figura 6).

La cantidad de cuencas de cada grupo fue variable en función de las características de las cuencas y subcuencas estudiadas. El Grupo 1 tenía únicamente la cuenca del Gualaguay, el Grupo 2 se conformó de 9 subcuencas y 1 cuenca, el Grupo 3 fue el más grande con 3 cuencas y 17 subcuencas, el Grupo 4 se conformaba de 3 subcuencas y finalmente el Grupo 5 se conformó con una cuenca y 7 subcuencas.

Posteriormente, a modo de verificar los resultados obtenidos con el análisis de Clúster se calcularon y graficaron las Curvas de Andrews en función de la agrupación ilustrada en los Dendrogramas. El método de las Curvas de Andrews es útil para representar gráficamente datos multidimensionales en sólo dos dimensiones. Cada punto dimensional es representado por una función como la expresada en la Ecuación (2):

$$f_x(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \sin(t) + X_3 \cos(t) + X_4 \sin(2t) + X_5 \cos(2t) + \dots$$

Ecuación (2)

siendo  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , las variables cuantificadas en donde el intervalo varía entre  $-\pi$  y  $\pi$ .

Para aplicar la función se reescribe la Ecuación (2) expresándola como una sumatoria presentada en la Ecuación (3):

$$f_x(t) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + \sum_{i=1}^{m1} X_{2i} \sin(it) + \sum_{i=1}^{m1} X_{2i+1} \cos(it)$$

Ecuación (3)

donde:

el valor de  $m1$  es  $\frac{n-1}{2} = m2$ , si  $n$  es impar. Y de la misma manera el valor de  $m1$  es igual a  $\frac{n}{2}$  y  $m2 = \frac{n}{2} - 1$ , si  $n$  es par.

La magnitud de cada variable de un individuo perteneciente a una población en estudio (en este caso las cuencas y subcuencas) afecta la frecuencia, la amplitud y la periodicidad de la función, dando una representación única para cada sujeto,

pero brinda una posibilidad especial de analizar el comportamiento hidrológico en conjunto con otros individuos. Graficando estas curvas se evidenció que efectivamente existía un patrón entre las cuencas pertenecientes a cada grupo en cuanto a amplitud, período y forma en general. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 7 las Curvas de Andrews del grupo 2.

A cada grupo se le aplicó el método de regresión lineal para obtener las ecuaciones de estimación de caudal máximo. Este método requiere que la cantidad de individuos sean igual a la cantidad de variables más uno.

En este estudio, las variables eran cuatro: el caudal máximo, la PMA, el área y la pendiente, y los individuos se conformaban con las cuencas y subcuencas, por lo tanto, fue necesario que cada grupo esté integrado por al menos 5 cuencas y subcuencas. Es por ello, que a través de las Curvas de Andrews y analizando los parámetros físicos e hidrológicos de las cuencas se reagruparon algunas de las regiones obtenidas con el Clúster para poder aplicar la regresión lineal.

En la Figura 8 se presenta a modo de ejemplo, un grupo resultante de la separación mediante Dendrogramas y verificado mediante el método de las Curvas de Andrews (Figura 7).

### Procedimiento para la determinación de ecuaciones de regionalización de caudales

Las ecuaciones de regionalización se definieron para cada grupo homogéneo permitiendo obtener los valores de caudal máximo para una determinada cuenca en función de las variables definidas y para la recurrencia que se adopte.

El desarrollo de las ecuaciones se realizó mediante un análisis de regresión lineal utilizando el Software RStudio. Para linealizar la ecuación de caudal se utilizaron las propiedades de los logaritmos adquiriendo la forma de la ecuación (4). Los coeficientes  $X, Y, W, Z$  determinados en RStudio se reemplazaron en la Ecuación 4 para las distintas regiones.

$$\ln(Q_{x_{años}}) = Z + X * \ln(A) + Y * \ln(P) + W * \ln(PMA_{x_{años}})$$

Ecuación (4)

siendo  $Q$ : caudal máximo,  $A$ : área,  $P$ : perímetro,  $PMA$ : Precipitación Media Areal.

Para verificar los resultados de caudal máximo obtenidos con las expresiones de regionalización se contrastaron con los valores de caudal aforados o modelados. Se consideraron válidas aquellas ecuaciones donde la diferencia entre caudal estimado y caudal conocido resultó inferior al 20%.

En los casos en que se superó el 20%, se procedió a eliminar la subcuenca que no verificaba y se recalcularon los coeficientes hasta obtener la ecuación que satisfizo para todas las cuencas y subcuencas del grupo.

### Análisis de los resultados obtenidos

Se obtuvieron ecuaciones para estimar caudales en función del grupo hidrológicamente homogéneo y la recurrencia deseada. A modo de ejemplo, se presentan en la Tabla 6 las ecuaciones para los grupos hidrológicamente homogéneos para 5 años de recurrencia y sus correspondientes valores de ajuste (Adjusted R-squared).

Obtenidas las ecuaciones de caudal para cada grupo de cuencas y subcuencas en función de la recurrencia, se procedió a determinar las características que definieron cada grupo, para ello se analizaron el área y pendiente de las cuencas y subcuencas que conformaban cada uno y se obtuvieron los resultados descriptos a continuación.

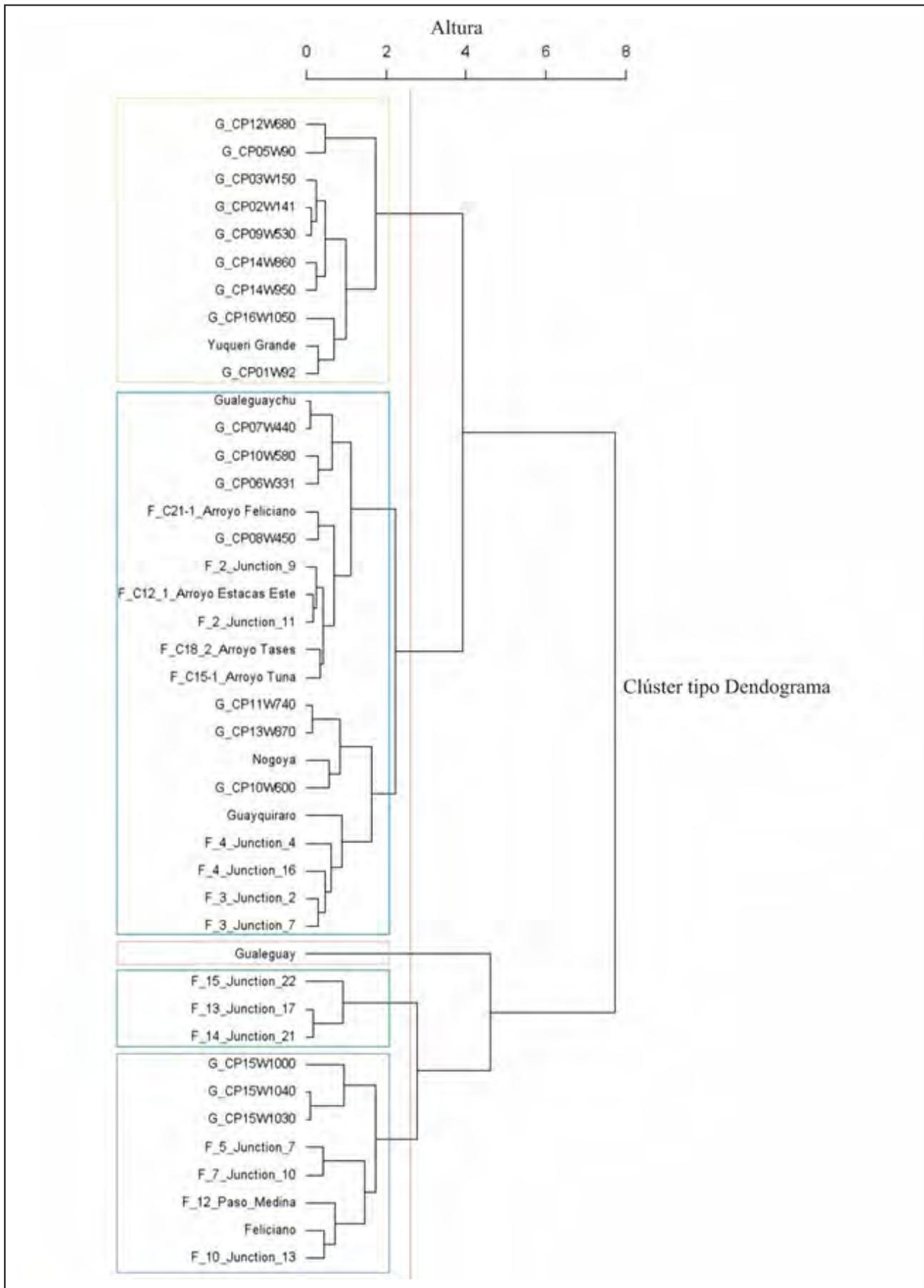


Figura 6. Dendrograma de grupos de cuencas y subcuencas.

**Tabla 6. Ecuaciones regionales para 5 años de recurrencia**

Grupo	Ecuaciones	Adjusted R-squared
1	$LN(Q5años)=29,733+0,841*LN(A)-0,104*LN(i)-5,491*LN(PMA)$	98,01%
2	$LN(Q5años)=7,699+1,160*LN(A)+0,487*LN(i)-1,340*LN(PMA)$	93,17%
3	$LN(Q5años)=0,030+0,568*LN(A)+0,713*LN(i)+1,378*LN(PMA)$	97,65%
4	$LN(Q5años)=13,584+0,138*LN(A)-1,148*LN(i)-3,296*LN(PMA)$	63,19%
5	$LN(Q5años)=-0,489+0,235*LN(A)+0,142*LN(i)+1,223*LN(PMA)$	98,88%

- **Grupo 1:** las características de la cuenca y subcuencas de este grupo son áreas grandes, entre 5.000 y 16.100 km<sup>2</sup> y bajas pendientes, entre 0,00021 y 0,00024 m/m.
- **Grupo 2:** las características de la cuenca y subcuencas de este grupo son áreas pequeñas, entre 160 y 710 km<sup>2</sup> y pendientes altas, entre 0,00092 y 0,0016 m/m.
- **Grupo 3:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo eran áreas menores a medias, entre 70 y 2300 km<sup>2</sup> y altas pendientes, entre 0,00042 y 0,00069.
- **Grupo 4:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo son áreas grandes, entre 740 y 5.100 km<sup>2</sup> y bajas pendientes, entre 0,00036 y 0,00052 m/m.
- **Grupo 5:** las características de las cuencas y subcuencas de este grupo son áreas grandes, aunque menores a las del Grupo 1, entre 2.400 y 7.000 km<sup>2</sup> y bajas pendientes, entre 0,00022 y 0,00038.

La caracterización de cada grupo desarrollada anteriormente se basó en la superficie y pendiente de sus cuencas componentes. Sin embargo, los grupos no resultaron fácilmente clasificables debido a que las características físicas e hidrológicas de las cuencas utilizadas para definirlos resultaron muy dispares para conformar grupos homogéneos y a la escasez de datos de entrada para el estudio debido a la falta de aforo en las cuencas de la provincia.

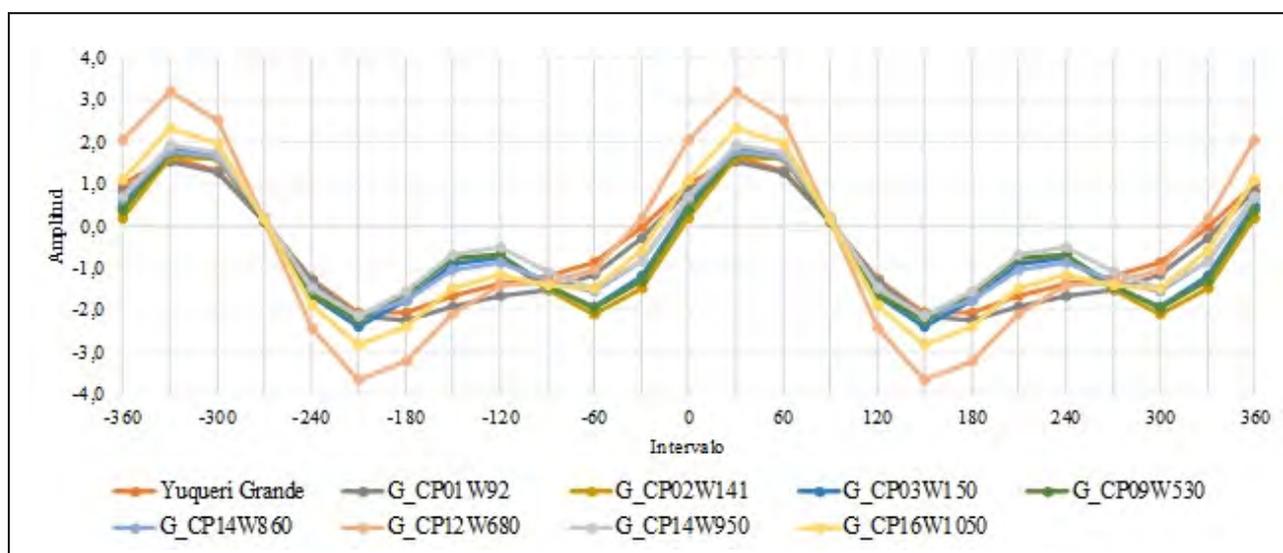
En la Figura 9 se graficó la segregación de cuencas y subcuencas en función de sus características físicas de área y pendiente. Se puede observar que los grupos obtenidos y descriptos anteriormente se mezclan en algunos casos ya que las cuencas pertenecientes a diferentes grupos comparten alguna de las características, como el Grupo 1 con el Grupo 5. Sin embargo, algunos grupos están bien definidos como el Grupo 2.

### Conclusiones

Inicialmente la investigación incluía únicamente cuencas que cuentan con estación de aforo dentro de la provincia de Entre Ríos, pero, debido a la escasez de información necesaria para aplicar las técnicas estadísticas y matemáticas, se incluyeron datos de subcuencas modeladas pertenecientes a las cuencas del arroyo Feliciano y el río Gualaguaychú para poder realizar el trabajo.

En función de esto se definieron, a través de metodologías estadísticas de análisis multivariado, cinco regiones de cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas como se presentan en la Figura 10. Estas regiones no resultaron fácilmente clasificables respecto a sus características físicas e hidrológicas debido a la variabilidad de los datos y a la escasez de mediciones existentes para utilizar como información de entrada.

Se desarrollaron ecuaciones regionales de caudales máximos para cada recurrencia planteada, para cada una de las cinco regiones analizadas.



**Figura 7. Curva de Andrews correspondiente al Grupo 2.**

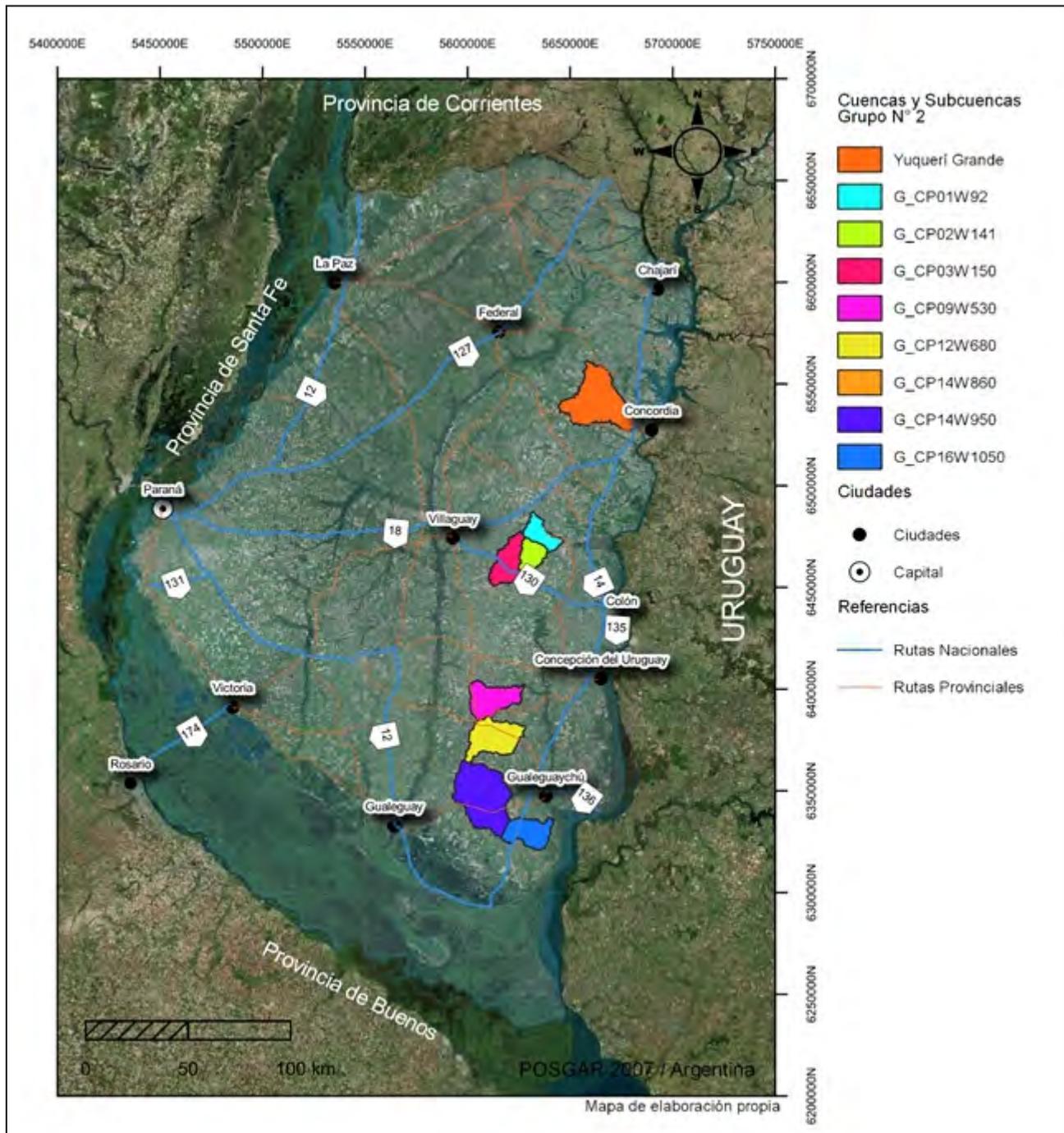


Figura 8. Grupo 2 cuencas y subcuencas hidrológicamente homogéneas.

Del conjunto de parámetros físicos e hidrológicos que definen el comportamiento de las cuencas, se adoptaron a través del análisis de correlación múltiple las variables de mayor incidencia sobre el caudal. Estas variables en orden de mayor a menor correlación con el caudal máximo fueron: la precipitación media areal, el área y la pendiente. La primera formó parte de la información hidrometeorológica utilizada para el estudio y las últimas dos fueron parte de los parámetros físicos que definen a las cuencas.

La investigación realizada constató la falta de registro de mediciones que proporcionen información sobre el com-

portamiento de la gran red hídrica que conforma la provincia de Entre Ríos. Esto resulta una gran problemática, al momento de resolver una situación donde intervienen aspectos hídricos en el diseño de una obra hidráulica o vial.

En este sentido, este estudio brinda ecuaciones prácticas que serán de utilidad para estimación de caudales máximos en forma aproximada. Las mismas no pretenden reemplazar la aplicación de modelos hidrológicos, sino que por el contrario pueden brindar resultados que convaliden a los obtenidos con modelos implementados en cuencas no aforadas que carecen de datos para su calibración.

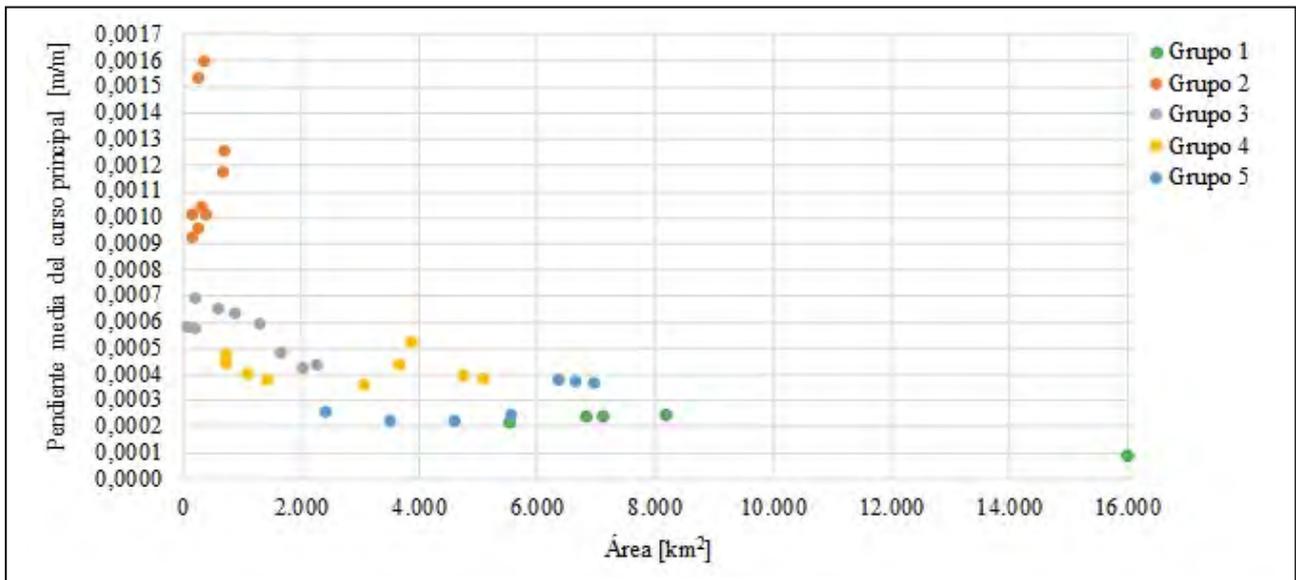


Figura 9. Segregación de grupos hidrológicamente homogéneos.

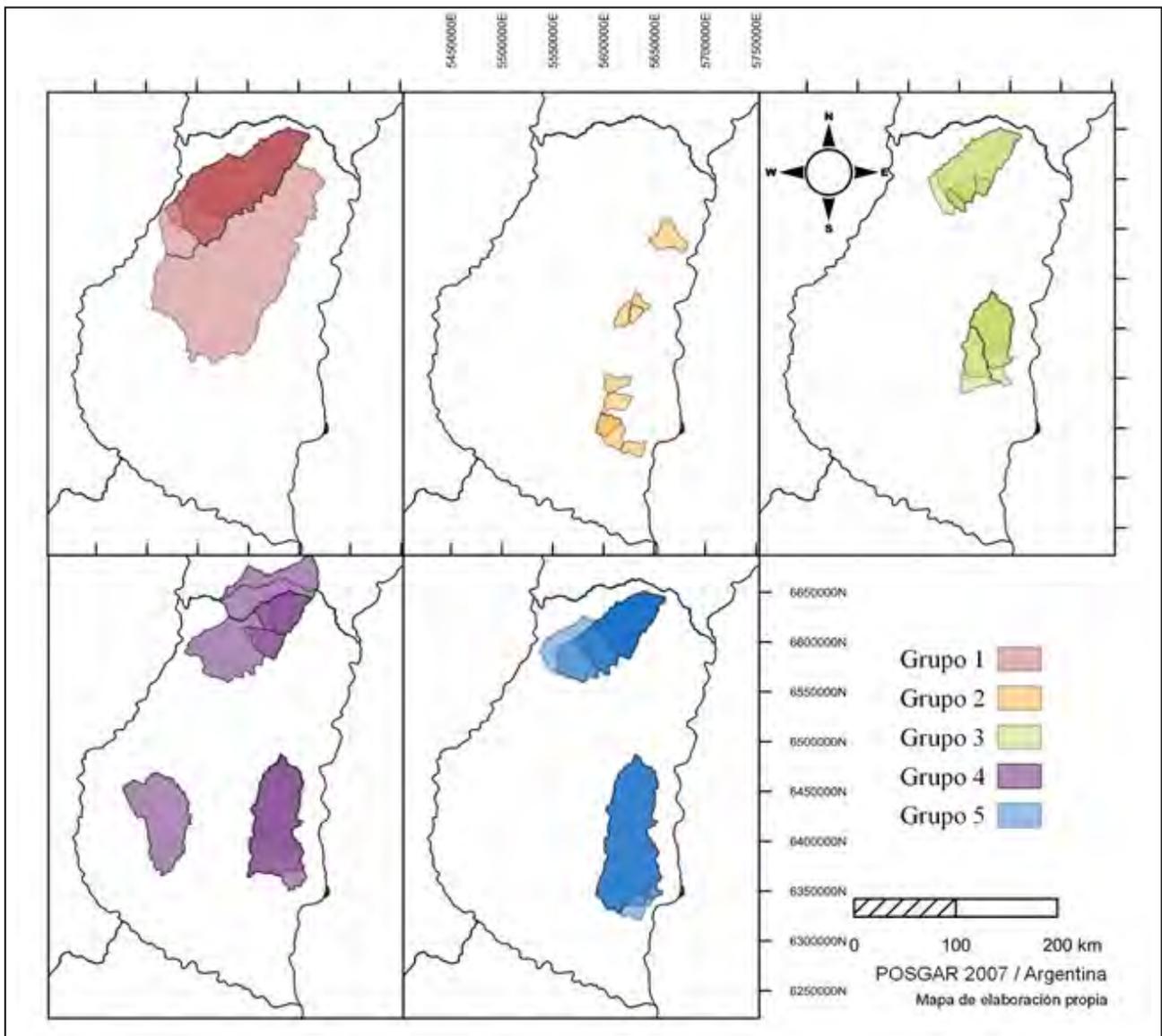


Figura 10. Regiones de cuencas hidrológicamente homogéneas.

### Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Skidelsky Spahn, Diana; Villaverde, Á. Gabriel; Mastaglia, María Inés; Ramírez Roxana; Sato, Rodolfo Giménez, Vanesa y Margasin, Andrea.

El primer borrador del manuscrito fue escrito por Skidelsky Spahn, Diana; Villaverde, Á. Gabriel; Mastaglia, María Inés;

Ramírez Roxana y Sato, Rodolfo y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

### Declaración de conflictos de intereses

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés

### Referencias Bibliográficas

- Andrews, D. F. (1972). Plots of high-dimensional data. *Biometrics*, 28(1), 125–136. <https://doi.org/10.2307/2528964>
- Bellman, R. (1957). Functional equations in the Theory of Dynamic Programming--VI, a direct convergence proof. *Annals of Mathematics*, 65(2), 215–223. <https://doi.org/10.2307/1969958>
- Bidegorry, M., Kohan, T. y Russian, F. (2021). *Regionalización de cuencas del arroyo Feliciano para estimación de caudales máximos*. Proyecto final de grado. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional. <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/5839>
- Bonomi, R., Collante Wojcicki, M., Gimenez, V. y Margheim, J. (2017). *Estudio de tormentas de diseño en las cuencas del arroyo Feliciano y río Gualeguaychú de la provincia de Entre Ríos*. Proyecto final de grado. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. (2a ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Devore, J. L. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. (7a ed.). Cengage Learning Editores.
- Grilli, R., Kessler, D. y Sturtz, E. (2021). *Regionalización de caudales máximos en la cuenca del río Gualeguaychú*. Proyecto final de grado. Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional.
- López, P. V., Sato, R., Mastaglia, M. I., Cattaneo, N., Masola, R., Giménez, V., Collante Wojcicki, M. D., Bruno, S. M., Margasin, A. D., Morley, S. A., Erbetta, A., Graziadio, V. y Villanueva, G. (2020). *Estudio de tormentas de diseño en cuencas extensas de la provincia de Entre Ríos*. (1a ed.). edUTecNe. <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/4479?show=full>
- Meneses, J. (2019). *Introducción al análisis multivariante*. Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya. <https://femrecerca.cat/meneses/publication/introduccion-analisis-multivariante/>
- Pisani, R. y Purves, R. (2007). *Statistics*. (4a ed.). W. W. Norton & Company.
- Sato, R. A. (2016). *Modificaciones en el riesgo de inundación fluvial debido al desarrollo urbano junto a ríos de llanura. Estudio de caso: la ciudad de Gualeguaychú*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. <http://hdl.handle.net/11185/834>
- Silva, C. (2013). Representación gráfica de información multivariante: aplicación al sistema de salud de Chile (2010). *Revista Chilena de Salud Pública*, 17(2), 117. <https://doi.org/10.5354/0719-5281.2013.27126>
- Tucci, C. E. M. (2002). *Regionalização de Vazões*. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - IPH – UFRGS.
- Zucarelli, G. (2017). *Regionalización hidrológica con métodos estadísticos multivariados*. Tesis doctoral. Programa Oficial de Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambiental, Universidade da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/19463>



# Viaducto carretero en ambientes de complejidad geológica-geotécnica

## Road viaduct in a site of geological-geotechnical complexity

 Marcelo E. Zeballos <sup>1</sup> \* -  Carlos Gerbaudo <sup>2</sup> 

\* Autor de contacto

Recibido: 16 de enero de 2023 • Aceptado: 20 de marzo de 2023 • Publicado: 22 de junio de 2023

### Resumen

Los problemas geotécnicos dentro de distintas obras de ingeniería siguen paradigmas de la teoría y de la práctica en proporciones variables. La ingeniería geotécnica tiene la posibilidad de emplear procedimientos de investigación y de cálculo estandarizados. Sin embargo, con frecuencia, las construcciones se ubican en sitios singulares, en los que la extrapolación de experiencias debe ser cuidadosamente empleada. En consecuencia, la toma de decisiones en la definición de componentes geotécnicos debe resolver el problema del vínculo entre la aplicación de métodos de cálculo convencionales y la adopción de soluciones no estandarizadas, como una adaptación al sitio de implantación de la obra.

La construcción de un viaducto carretero de 800 metros, sobre la ladera oeste de las Sierras Chicas, en la provincia de Córdoba, Argentina, muestra este tipo de situaciones. La obra se ubica en una zona de montaña, sobre el sector correspondiente a la falla de formación de las sierras. El estudio geotécnico de este sector y la experiencia en la construcción de la propia obra llevaron a la modificación del diseño original. Definida la solución estructural y el nuevo proyecto ejecutivo, durante la construcción las cimentaciones de los puentes fueron adaptados a cada condición geotécnica local.

Esta publicación muestra la forma en que se ha evaluado la interacción entre el terreno y la estructura, concluyendo en la definición del cimiento de los puentes. Se formulan reflexiones respecto de la necesidad de evolucionar en el conocimiento del ambiente a través de las distintas etapas del proyecto, desde su concepción hasta su materialización, así como la conveniencia de la auscultación durante la vida útil de la obra.

**Palabras clave:** estabilidad de laderas, cimentaciones, capacidad de carga.

1. Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Consultor de ZCI y Asociados.

2. Profesor Titular de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Consultor de INGROUP Ingeniería.

## Abstract

Geotechnical problems in engineering constructions follow paradigms of theory and practice in variable proportions. Geotechnical engineering has the possibility of using standardized research and calculation procedures. However, frequently, the constructions are located in singular places, in which the extrapolation of experiences must be carefully used. Consequently, decision-making in the definition of geotechnical components must solve the problem of the link between the application of conventional calculation methods and the adoption of non-standardized solutions, such as an adaptation to the site of implementation of the work.

The construction of an 800-meter highway viaduct, on the west slope of the Sierras Chicas, in the province of Córdoba, Argentina, shows this type of situation. The work is located in a mountain area, on the sector corresponding to the formation fault of the hill. The geotechnical study of this sector and the experience in the construction of the work itself, concluded in the need to modify the original design. Despite having defined the structural solution and developed the new executive project, during construction the foundations of the bridges were adapted to each local geotechnical condition.

This publication shows the way in which the terrain-structure interaction has been evaluated, concluding in the definition of the foundation of the bridges. Reflections are formulated regarding the need to improve knowledge of the site through the different stages of the project, from its conception to its construction, as well as the convenience of auscultation during the useful life of the work.

**Keywords: slope stabilization, foundation, bearing capacity.**

## Introducción

En el tratamiento de diversos problemas de superestructura de transporte (calzadas, vías, tableros de puente), los procesos de diseño y resolución de los componentes siguen lineamiento de investigación, análisis, diseño preliminar y cálculo establecidos convencionalmente. Son numerosos los reglamentos y manuales de diseño que indican las acciones que se deben tomar en consideración para la resolución de los diversos componentes de una obra de infraestructura. Estos procesos se resumen en manuales de diseño, guías de procedimiento o normas y reglamentos de trabajo. Cabe destacar que estos elementos permiten una aplicación secuencial de los pasos de resolución, basándose especialmente en el adecuado conocimiento de las características de los materiales afectados.

Los componentes de la subestructura vial, tanto el terraplén de la vía, como su cimiento, obras complementarias y cercanas al trazado, suelen tener niveles de análisis sensiblemente menores, respecto de los aplicados en las superestructuras. Se puede ver esto como una práctica frecuente, pero no necesariamente correcta. Dependiendo de los ambientes en los cuales se desarrolla la obra, el tratamiento de la subestructura y la cimentación puede mostrar un comportamiento complejo. Las variaciones resultan altamente evidentes en las comparaciones de construcciones realizadas en zonas de llanuras, en las cuales la deposición de los suelos de cimentación guarda cierto grado de uniformidad, dentro de espacios suficientemente extensos. En ambientes serranos o de montaña las situaciones que se observan pueden caracterizarse por la variabilidad de los materiales encontrados y la heterogeneidad de comportamiento, mostrando estas sensibles modificaciones parámetros en espacios reducidos, con la consiguiente dificultad de detección a través de los distintos procesos de investigación.

Es conocido en la geotecnia el concepto de que muchas veces obras similares se implantan en ambientes singulares. A diferencia de lo que se puede considerar para materiales constituidos por el hombre, las formaciones de suelos y rocas presentan las siguientes características: a. Son formaciones naturales, sin ningún control de calidad específico; b. No se

conocen completamente en su composición y estructura, antes, durante e incluso después de la construcción; c. Presentan propiedades mecánicas variables, tanto en espacio como en tiempo; d. Presentan una estructura comúnmente heterogénea y anisótropa; e. El medio es poroso con distintos grados de saturación, en el que la interacción sólido-fluido puede resultar compleja y, f. Los macizos rocosos muestran fracturación, planos de discontinuidad y fallas, lo cual puede derivar en procesos mecánicos y de inestabilidad típicos de medios discontinuos.

Se suma a esta situación la condición clásica de conformación de las vías de comunicación, basada en la movilización de suelos (y/o rocas), a fin de materializar el espacio de localización de la traza, a través del movimiento de suelos para la generación del terraplén de apoyo, o mediante excavaciones, que permitan lograr el espacio necesario para el posicionamiento del coronamiento, sobre el cual se implanta la zona de circulación.

En consecuencia, al margen de que gran parte de la industria de la construcción de vías de comunicación se concentra en la caracterización de materiales propios de las superestructuras (especialmente vinculados con las capas de rodamiento de concretos asfálticos o pavimentos de hormigón, pilas y tableros de puentes), es necesario recordar que una fracción importante de la obra demanda la consideración de los aspectos geológicos y geotécnicos que rodean a la propia zona de implantación.

Durante mucho tiempo, la forma más directa de materialización de las vías se ha basado en la selección de los ambientes lo más "inertes" posibles para el emplazamiento, construyendo sobre ellos con materiales de alta calidad. Esta condición implica la disposición de medios y recursos para la obtención de esos emplazamientos nobles y la utilización de los materiales de alta calidad a fin de lograr el objetivo pretendido. Con el paso del tiempo, algunos paradigmas de solución han sufrido modificaciones, estableciendo la necesidad de una mayor conciencia ambiental en primer lugar, lo cual lleva a establecer un uso de mayor nivel de racionalidad en los materiales, al mismo tiempo que implica la aceptación del condicionamiento impuesto por el propio emplazamiento

de la vía, sobre terrenos mecánicamente menos favorables. Se suman a estos aspectos la necesidad de procurar un uso racional de los recursos, minimizando las huellas de carbón, lo cual determina que la extracción desmedida de materiales desde yacimientos, para la conformación de terraplenes o la ejecución de excavaciones de grandes magnitudes, debe competir abiertamente con la posibilidad de otras soluciones que involucren un menor movimiento de suelos.

La trascendencia de este tema es reconocida por la WRA (2019), en su Catálogo de Riesgo de Proyecto. En síntesis, la búsqueda de soluciones de construcción con bajo nivel de afectación del medio, por propio convencimiento, o por necesidad de respetar aspectos complementarios al tratamiento de la vía en sí misma, se ve ampliamente incrementada en las últimas décadas. En este punto, los principales elementos que hacen al tratamiento de una solución sustentable pueden ser agrupados en: a. Interpretación de las singularidades de los suelos de cimentación y sus fenómenos asociados, b. Tratamientos que impliquen una mejora de los suelos locales para la conformación de la subestructura de la vía, sin necesidad de recurrir a materiales provenientes de canteras o yacimientos, c. Condicionantes ambientales globales que pueden derivar en obras con mejor nivel de integración al entorno sobre el cual se emplazan, con bajo impacto en las condiciones de drenaje local o inclusive en los componentes visuales del paisaje.

El caso que aquí se presenta es el resultado de este tipo de consideraciones. La Ruta Provincial 34, en la provincia de Córdoba, Argentina, cruza en dirección oeste este la formación denominada Sierras Pampeanas. La construcción del trazado se ha realizado en forma segmentada durante décadas. Re-

cientemente, se ha materializado el último tramo de vinculación, el cual comprende un trazado de 14,5 km, que atraviesa las denominadas Sierras Chicas, última formación montañosa, al este del trazado. La Figura 1 muestra la localización de la traza y el sector referido en esta publicación.

La vía ha sido concebida como un camino de montaña, el cual se ha desarrollado mayormente a través de trabajos de excavación sobre la montaña y constitución de terraplenes con alturas variables. Las excavaciones han sido realizadas para permitir la generación de los típicos perfiles de media ladera vial. El ambiente sobre el cual se encuentra materializada la traza de la vía implica su implantación en la ladera occidental de las Sierras Chicas. Este sector, perteneciente a una zona de fallamiento dentro del cual se ha generado la propia serranía, presenta formaciones con un alto grado de tectonización, con componentes que desarrollan procesos de meteorización notablemente rápidos, especialmente cuando el material se desconfinan y se pone en contacto con el aire.

En consecuencia, la conservación de los criterios generales de construcción sobre este sector del trazado hubiera implicado la realización de excavaciones de grandes dimensiones, combinadas con terraplenes de gran altura que rellenarían las quebradas intermedias. En consecuencia, la previsión inicial de tratamiento del sector implicaba un efecto de grandes movimientos de suelo y un importante impacto visual. Esta situación derivó en la necesidad de establecer un primer paso de revisión del proyecto, procurando una solución con menor nivel de afectación de las laderas. Las diferentes instancias de revisión de la situación original concluyeron en la conveniencia de ejecución de un sistema de viaductos formado por cuatro estructuras que, en conjunto, determinan una longitud de



Figura 1. Localización del trazado final del "Camino de Altas Cumbres".

800 metros. Establecida esta opción como la más conveniente para el tratamiento de este sector de la vía, se deriva inmediatamente la necesidad de consideración de los aspectos vinculados con las condiciones de cimentación de las estructuras. La Figura 2 muestra una vista aérea del trazado, previa a la ejecución de las obras.

Se muestra a continuación el tratamiento dado al sector, los elementos empleados para el desarrollo del estudio, en combinación con las acciones durante el período de construcción tendientes a la validación o revisión de las hipótesis originales de diseño. Se interpreta el caso como una situación típica de aplicación del concepto clásico de uso de Método Observacional, característico del tratamiento de problemas geotécnicos. De esta forma, se considera que además de la singularidad del caso, resulta de interés como ejemplo respecto de la necesidad de validar permanente durante el desarrollo de la obra las condiciones previstas en la etapa de proyecto, o en caso de necesidad, efectuar los ajustes pertinentes durante el propio desarrollo de la construcción.

### Identificación del problema

#### Geología regional

Las Sierras Pampeanas de Córdoba constituyen el grupo más oriental de la Provincia Geológica Sierras Pampeanas. Está conformada aquí por cuatro cordones mayores (Sierras de Guasapampa, Pocho y Altautina; Sierras Grande y de Comechingones; Sierras Chica y de las Peñas; Elevación Pampeana) y dos menores (Sierras de Ciénaga del Coro y del Tigre). Estos cordones, a su vez, emergen como un conjunto de la Llanura Chaco-Pampeana. El estudio de *Siegesmund et al (2010)* contiene bibliografía abundante respecto de estudios realizados en esta zona.

En ellas predominan rocas cristalinas de edad precámbrica a paleozoica inferior y granitoides paleozoicos, orientados norte-sur y separados por sedimentos intermontanos mesozoicos y cenozoicos. En la región central-oeste se presentan un conjunto de vulcanitas traquiandesíticas y depósitos piroclásticos neógenos que se sobreponen al paisaje de bloques basculados mayoritariamente al este. La Figura 3, construida a partir de *Martino et al (2012)*, muestra los complejos y formaciones de las Sierras Chicas y el sector de emplazamiento de la obra.

La geología local está representada por rocas que pertenecen al complejo metamórfico Sierra Chica (Precámbrico superior a Cámbrico medio), cuyos afloramientos presentan una distribución regional en este ámbito. Dentro de este complejo metamórfico de alto grado, se reconocen dos unidades menores, que se denominan Gneises Sierra Chica y Anatexitas Sierra Chica. Un rasgo geotectónico relevante del sector en estudio y que determina las condiciones estructurales del macizo rocoso en el sector, es la falla de la Sierra Chica o de Punilla.

Se trata de una estructura regional de carácter inverso, orientación general norte-sur y plano buzante al este (entre 35°-60°). En la zona específica de análisis, la misma presenta una bifurcación paralela, lo cual favorece el desarrollo de una faja de deformación cataclástica de aproximadamente 400 m de ancho, con litotipos brechados asociados. La Figura 4 muestra un esquema de un perfil regional del sector, con la indicación de la posición relativa de la traza.

La falla de las Sierras Chicas es una de las fallas más importantes de las sierras de Córdoba, extendiéndose su escarpa de falla por más de 200 kilómetros desde la localidad de Capilla del Monte, en el norte del Valle de Punilla, hasta la cercanía del lineamiento Los Cóndores.



Figura 2. Localización del sector de ubicación de viaductos, entre pk 06+000 y pk 08+000.

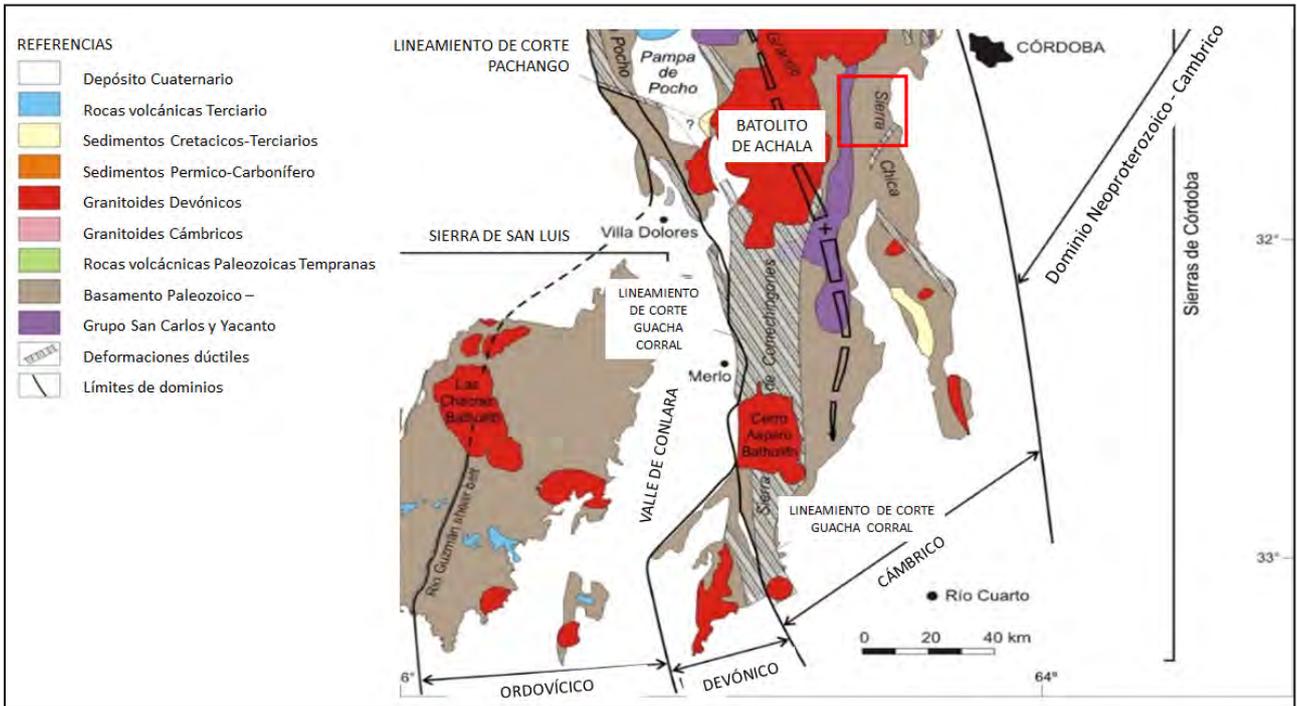


Figura 3. Geología de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. Adaptado de Martino et al (2012).

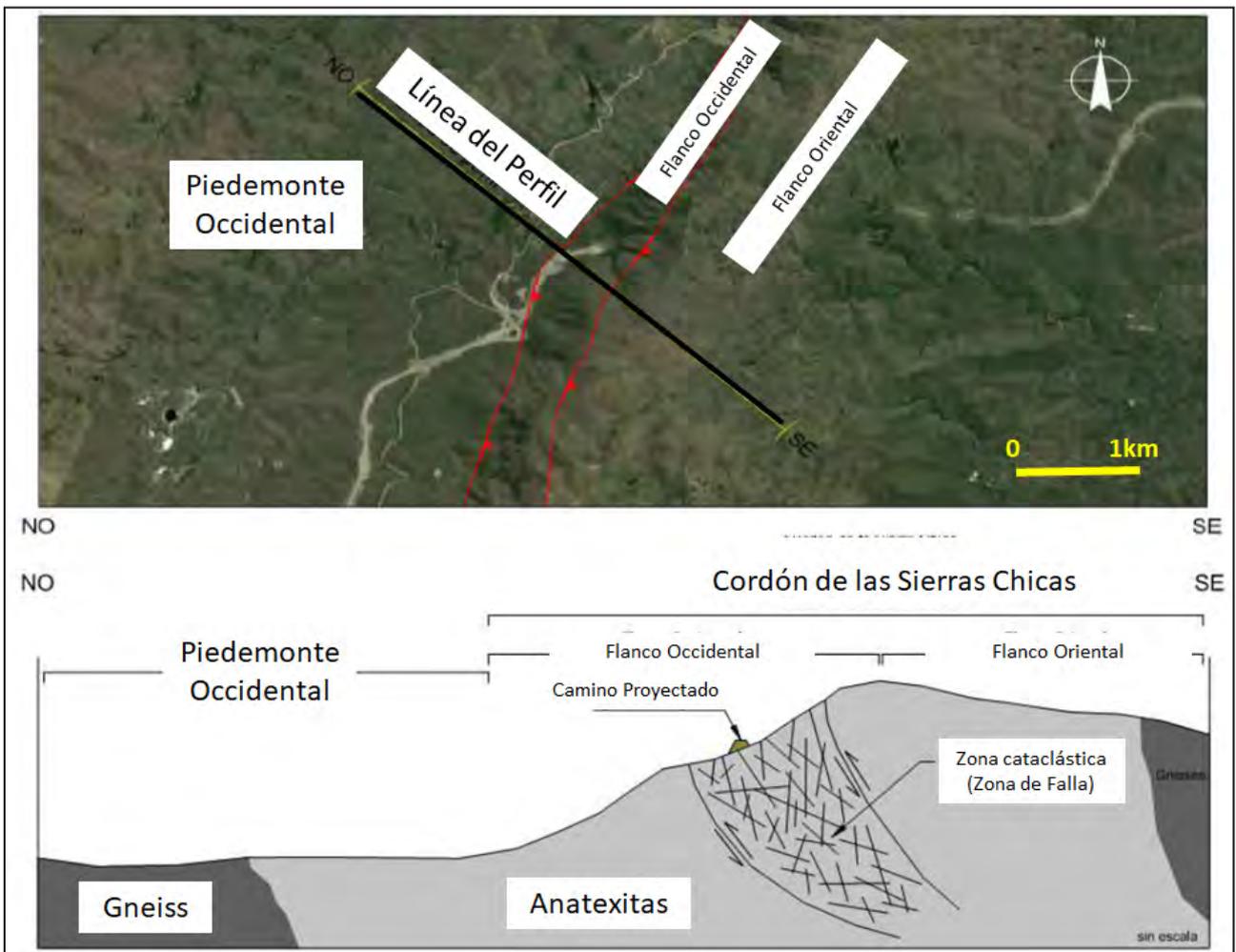


Figura 4. Perfil transversal de las Sierras Chicas. Localización el sector de interés. Fuente: AbyaTerra, (2015).

Como consecuencia de la deformación producida por la actividad neotectónica terciaria y cuaternaria, el basamento cristalino a lo largo de esta faja se encuentra intensamente fracturado y, por ende, con diverso grado de meteorización debido a los fluidos percolantes en el medio rocoso. Este sector de traza se ubica en el ambiente indicado. Se ha observado la presencia de anatexitas (migmatitas) y gneises, que se encuentran completamente afectados por cataclasis (brechamiento) y alterados químicamente. Esta condición de fracturamiento y alteración de las rocas implicadas en el sector, determinan la característica y calidad geomecánica del macizo rocoso en análisis.

En el marco de la caracterización de la actividad sísmica de la región, y en particular en referencia a la identificación de parámetros de aplicación en estudios de ingeniería, se destacan los estudios de *Rocca et al (1981)* y *Rocca (2008)*.

### Geología local

En la serie de estudios específicos realizados sobre el sector de interés la caracterización geológica de la zona de emplazamiento ha sido resumida en *Abyterra (2015, antes citado)*. El relieve local es fuerte a muy fuerte, en respuesta a la génesis antes descrita, con pendientes medias comprendidas entre 35% y 50%. Las laderas presentan perfiles rectilíneos interrumpidos en forma aislada por crestones asociados a la erosión diferencial. Los tributarios del sistema de drenaje tienen frecuentes tramos rectos, motivados por el control que ejercen fallas y fracturas, corriendo encajados en valles estrechos.

En particular, el sector en el que se ubican los viaductos se desarrolla en alturas que rondan los 890 m.s.n.m., en el

sector sur, hasta alcanzar el filo cumbral de la sierra a esta latitud, aproximadamente, a 1150 m.s.n.m.

Los reconocimientos preliminares sobre el sector, especialmente sobre los frentes excavados al sur del emplazamiento de los viaductos, mostró la existencia de zonas de falla, de continuidad apreciable (> 7 m de longitud) y espesores que alcanzan los 2 m, con buzamientos e inclinación variables. Estas fallas se caracterizan por estar conformadas por materiales extremadamente fragmentados y presentar una coloración verdosa como consecuencia de los minerales arcillosos neoformados en dichas estructuras, tal como se observa en la Figura 5. Este tipo de estructuras favorecen la concentración de agua, lo cual agudiza los posibles riesgos de deslizamientos localizados. En general, las estructuras descritas no se encuentran aisladas, sino que se manifiestan conjuntamente con otras fallas de similares características, formando un sistema conjugado de fracturas, tal como se observa en la Figura 6.

En cuanto a los procesos erosivos detectados, se aprecian dos componentes básicos. Por un lado, la erosión por arrastre del agua en forma laminar sobre los planos de corte y concentrada en quebradas, la cual queda evidenciada por los regueros producidos por la acción hídrica en los frentes de corte analizados. Los materiales granulares arrastrados se acumulan al pie del talud en conjunto con los bloques liberados por efecto gravitacional, conformando pequeños depósitos detríticos, que muchas veces se interfieren entre ellos. Por otra parte, se observaron deslizamientos o avalanchas localizados de detritos. En algunos casos, estas avalanchas están asociadas a los regueros más evolucionados y conforman depósitos de dimensiones considerables.

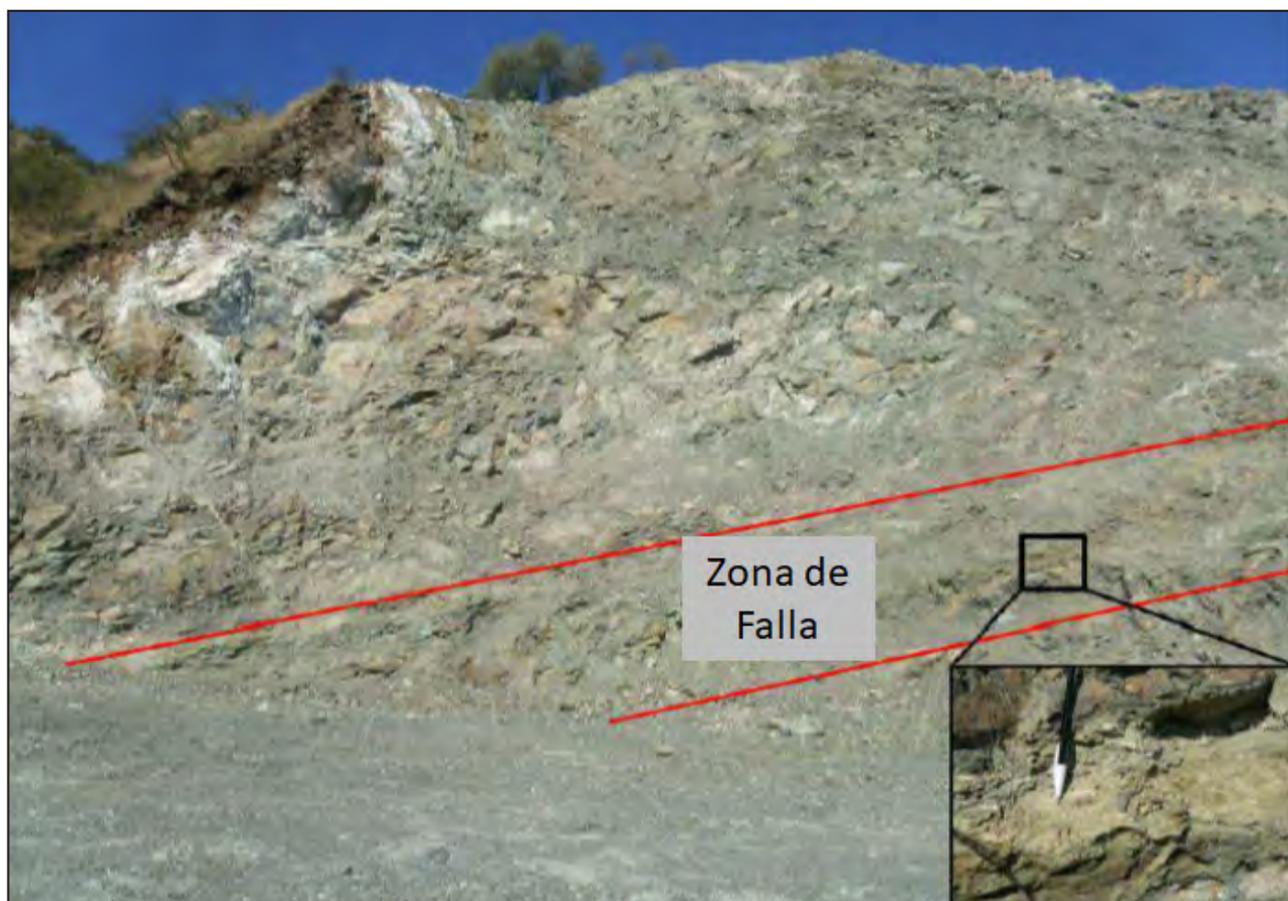


Figura 5. Vista de excavaciones al sur del sector de viaductos. Presencia de fallas continuas.

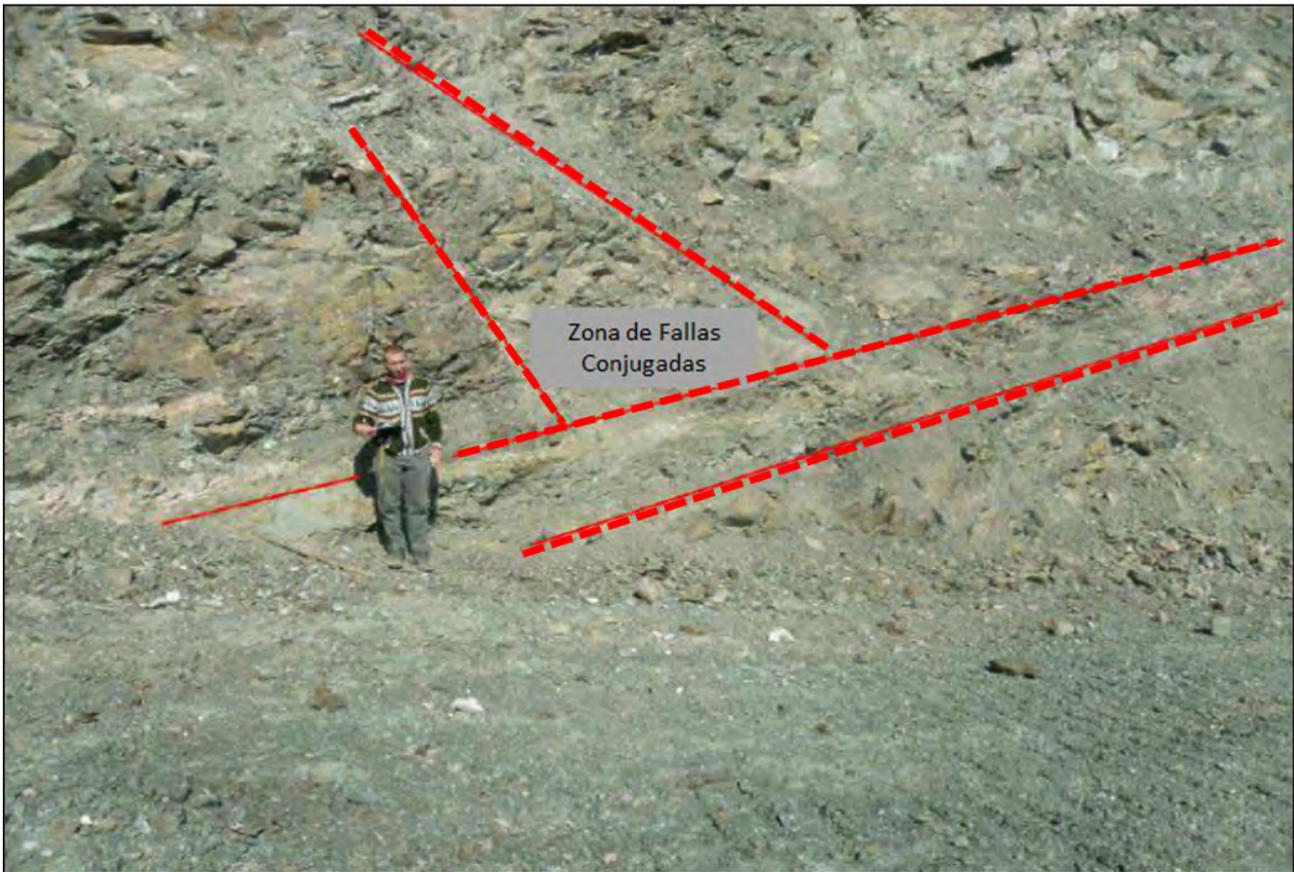


Figura 6. Vista de fallas conjugadas en sectores excavados al sur del emplazamiento de los viaductos.

### Caracterización geotécnica

Sobre el sector se realizaron diversos estudios geotécnicos para caracterizar mecánicamente el material. Los primeros reconocimientos se vincularon con la aplicación de métodos de prospección geofísica. Estos identificaron la siguiente secuencia de materiales:

**Cobertura Superficial**, generada por suelos de tipo limoarenosos, arcillas limosas y arenas. Sus propiedades resistencias son bajas en función de sus condiciones de deposición recientes. Esta cobertura tiene un espesor del orden de 3 a 4 metros.

**Formación rocosa superior**. Sobre la cual se han detectado velocidades de propagación de onda de entre 1.000 y 2.000 m/seg. Se interpreta como una formación con un grado de alteración medio a alto, y un espesor del orden de 20 a 25 metros. Para este material, se ha asignado una calificación de calidad de macizo rocoso, según el parámetro GSI (Geological Strength Index, por su denominación en inglés) del orden de 25, según el modelo denominado de Hoek y Brown (Hoek, 1994; Hoek y Diederichs, 2006; Marinos et al, 2005; Hoek y Brown 1997).

**Formación de Base**. Constituida por los estratos inferiores en los cuales se aprecian velocidades de propagación superiores a los valores antes indicados. Para esta formación se asigna un coeficiente GSI del orden 35 a 50.

Como se muestra más adelante, los estudios efectuados en la etapa de anteproyecto y proyecto mostraban que la continuidad del sistema de construcción, basado en la excavación

y el terraplenado, podía derivar en una solución con grandes volúmenes de movimientos de suelos y alta afectación ambiental local. Esta situación derivó en el planteamiento de una alternativa de construcción de estructuras “externas” a la ladera. Ante esta opción se complementaron los estudios geotécnicos con la realización de campañas de sondeos en los sitios previstos para cada punto de apoyo de los viaductos. Los reconocimientos se concentraron en la identificación de los siguientes elementos:

- Caracterización litológica de los materiales afectados. Se encontraron, fundamentalmente, formaciones de gneiss migmatíticos, con distintos grados de fracturación. Igualmente, intercalaciones de paragneis e inclusiones o filones de tipo pegmatítico.
- Descripción del grado de recuperación de los testigos e identificación del RQD (Rock Quality Designation por su denominación en inglés) (Deere y Deere, 1989).
- Caracterización de las discontinuidades observadas, a nivel de localización, tipo de rellenos, ángulo, abertura, rugosidad, etc.

La Tabla 1 resume la cantidad de sondeos efectuados. Se aprecia que los sondeos fueron efectuados en cada punto de apoyo de cada uno de los cuatro viaductos, con una profundidad de investigación variable entre los 20 y 25 metros. Los niveles de recuperación de material han sido elevados, en tanto que el valor de los RQD resulta variable según las localizaciones, tanto en planta como en profundidad.

**Tabla 1. Composición de la campaña de investigación a través de sondeos mecánicos.**

Viaducto	Apoyos	Long Sondeos(m)	Recuperación Testigos(%)	RQD(%)
1	7	180	89	35 - 55
2	4	85	93	35 - 45
3	7	158	75	10 - 30
4	5	110	94	50 - 75
Total		533		

Con todos estos elementos se efectuaron caracterizaciones locales del macizo rocoso en profundidad, estableciendo el parámetro GSI como un indicador general de la calidad de la roca. De esta forma, se establecieron para cada uno de los cuatro viaductos parámetros geotécnicos locales de aplicación en los modelos de capacidad de carga y estabilidad. En esta caracterización se identificaron parámetros correspondientes a los niveles superiores del macizo, con menor calidad mecánica, y los niveles de apoyo e inferior del macizo, con parámetros mecánicos de mayor calidad. A modo de ejemplo del tratamiento aplicado, se presenta al Tabla 2, la cual muestra las variables de referencia empleadas en cada punto de apoyo.

En cuanto al tratamiento sísmico del sector, se efectuaron análisis complementarios a los derivados de las normativas locales (*Reglamento CIRSOC 103*), concluyendo que las condiciones generales de aceleración aplicables en el sector, a los fines de análisis pseudoestáticos, debían tomar un valor de 0,12 g, como referencia.

### Características de la obra vial

La concepción general de desarrollo de la vía en el marco del proyecto inicial implicaba la conformación de una sección transversal típica de camino de montaña, basada en el desarrollo de contrataludes excavados en la ladera y el completamiento del perfil de terreno con el correspondiente terraplén. En su

previsión original el sector finalmente ocupado por los viaductos, del orden de 2.000 metros de desarrollo lineal, debía desarrollarse según el lineamiento anterior, de excavación de contratalud y terraplenado. Los análisis efectuados en la etapa de ingeniería de detalle, disponiendo de mayor nivel de información geotécnica sobre el sitio, permitieron establecer las siguientes consideraciones:

- La previsión de excavaciones de contrataludes en el sector podían derivar en volumen de material extraídos muy importante. Al mismo tiempo, si bien las previsiones iniciales de inclinación del talud eran del orden de 1,5h:1,0v, según experiencias ya observadas en sitios previos podían derivar en taludes más tendidos localmente. En consecuencia, desde el punto de vistas de las excavaciones en el sector los volúmenes de material a extraer resultaban sensiblemente superiores a la media de excavación que se preveía para el conjunto de la obra. Por otra parte, la realización de excavaciones tan amplias implicaba un nivel de impacto ambiental visual altamente significativo. La Figura 7 muestra el impacto visual que generan las excavaciones en la ladera en el sitio inmediatamente previo a la zona en la cual se ubicaron los viaductos.
- Por otra parte, la conformación de terraplenes en el sector indicaba que los mismo podían demandar alturas superiores a los 30 metros. Esta situación establecía la dificultad complementaria de realización de trabajos adecuados de compactación en sitios alejados de la zona de ubicación de la propia calzada. La conformación de un terraplén en estas condiciones demanda la realización de vías de acceso auxiliares a la base de los propios terraplenes, con las complejidades adicionales que eso establece para el desarrollo de la obra.

La Figura 8 muestra la previsión original de la disposición en planta del trazado, indicando los espacios ocupados por las excavaciones en la ladera, así como la característica general del perfil transversal originalmente planteado.

**Tabla 2. Ejemplo de parámetros geotécnicos aplicación a la cimentación del viaducto 4.**

Estrato	Variable	Unidad	Est Sur	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Est Norte
Roca Superior	Tipo		Paragneiss	Paragneiss	Paragneiss	Paragneiss	Paragneiss
	Espesor	m	5,00	5,00	5,00	6,50	5,50
	GSI		50	30	40	45	45
	Resis Comp	Mpa	20	20	15	25	15
	ckPa	24	9	9	26	29	
	$\varphi^\circ$	70	69	67	68	70	
	Módulo	kPa	630,230	220,730	255,520	630,230	1,542,000
Roca Profunda	Tipo		Paragneiss	Parag-Ortog	Parag-Ortog	Paragneiss	Parag-Ortog
	GSI		50	55	55	50	75
	Resis Comp	Mpa	25	25	25	25	30
	ckPa	35	48	48	52	142	
	$\varphi^\circ$	67	70	70	69	70	
	Módulo	kPa	630,230	2,400,000	2,400,000	1,542,000	5,689,000
	kh	kN/m <sup>3</sup>	420,153	1,600,000	1,600,000	1,028,000	3,792,667



Figura 7. Vista del sector de viaductos previa a su ejecución, y del sector de trazado ejecutado por excavación y terraplenado.

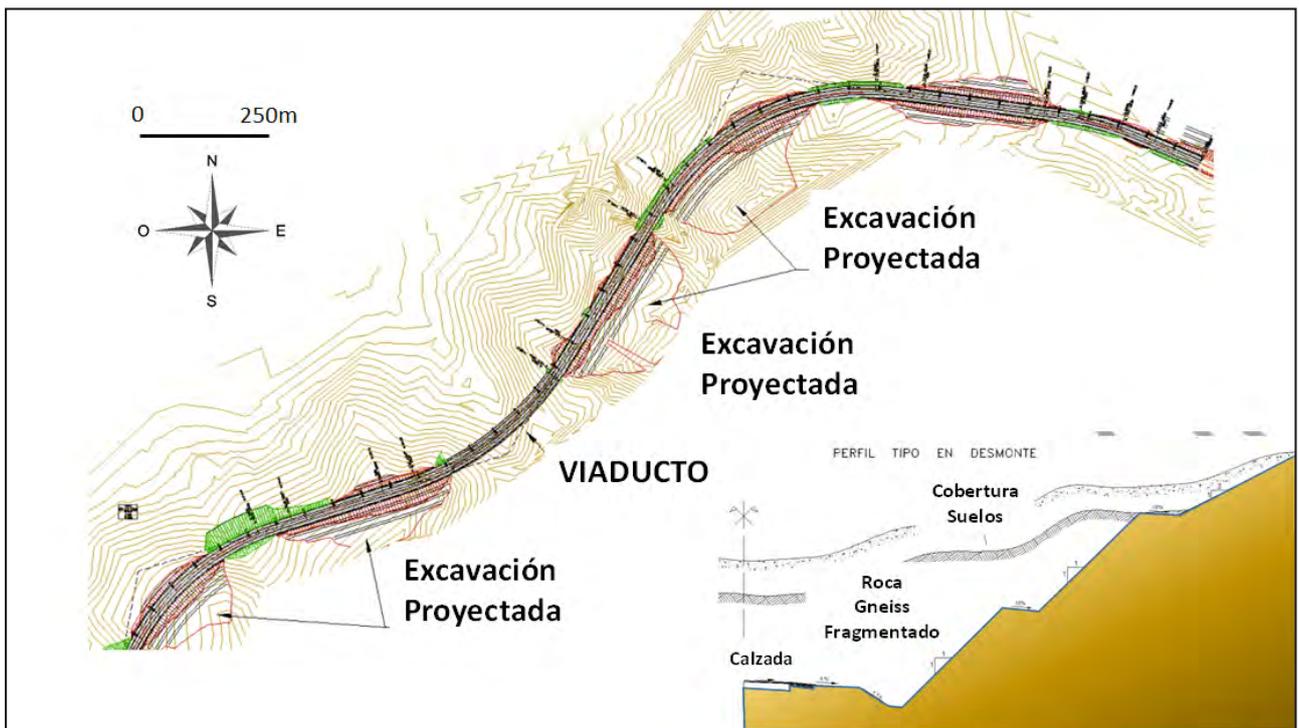


Figura 8. Propuesta inicial de tratamiento del sector a través de excavación y terraplenado.

La situación así formulada derivó en un análisis específico del sector, con los siguientes objetivos:

Reducir las excavaciones, lo cual al mismo tiempo de provocar una reducción del impacto visual, permitirían también disminuir la incertidumbre respecto del volumen de material que efectivamente debería ser extraído para lograr una adecuada condición de estabilidad

Reducir el terraplenado, permitiendo disminuir los trabajos requeridos varios metros por debajo del nivel de rasante de calzada, para establecer un pie de terraplén con el grado de compactación que efectivamente demanda este componente.

Para cumplir con el objetivo anterior se optó, luego del análisis de varias alternativas por una solución basada en la

construcción de viaductos, que alejaba hacia el oeste la posición de la traza. Los viaductos se han cimentado en forma superficial, con excavación local hasta alcanzar un plano de apoyo adecuado en cada sitio. De esta forma la combinación estructural adoptada reduce significativamente el impacto visual sobre la ladera. Construidas las pilas el montaje de vigas principales de cada puente se realiza a través de la utilización de una viga de lanzamiento.

En conclusión, la búsqueda de esta mejora en la disposición del trazado, basada en la experiencia generada durante el propio proceso constructivo, ha determinado un reposicionamiento de la traza. La Figura 9 permite visualizar los 4 viaductos generados en el sector. La Figura 10 muestra el perfil longitudinal del viaducto 1, con más de 240 metros de largo y su pila de mayor con una altura de superior a los 65 metros.

### Tratamiento de la definición del sistema de cimentación

#### Conceptos generales de análisis del cimiento

La campaña geotécnica de investigación de los puntos de apoyo de los 4 componentes del sistema de viaductos se ha basado en una investigación geotécnica la cual ha comprendido una campaña inicial basada en la ejecución de sondeo mecánicos con extracción de testigos de roca, la realización de ensayos de compresión simple de los testigos representativos, la identificación de los materiales afectados en los sondeos y, finalmente, la caracterización del macizo según el criterio general del modelo de Hoek y Brown, antes mencionado. Los resultados de los reconocimientos efectuados permitieron confirmar los reconocimientos preliminares. Por debajo de las cubiertas de suelos, se presentan alternancias de formaciones



Figura 9. Planta del sector con la alternativa de ejecución de viaductos.

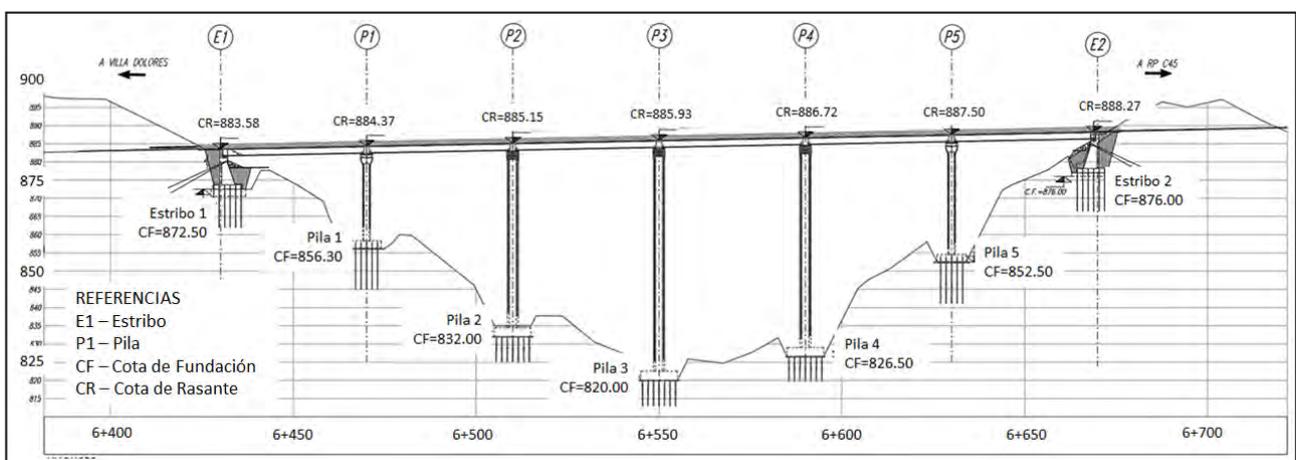


Figura 10. Perfil longitudinal de viaducto 1.

de gneiss, con distintos grados de rigidez y condiciones de fragmentación.

En todos los casos, los materiales encontrados en los distintos puntos de apoyo de los puentes muestran una variación de la calidad de los materiales atravesados, con una tendencia al incremento en la recuperación y en los valores de RQD. Estos datos fueron tomados como base para la definición de los planos de apoyo a alcanzar en cada punto de apoyo a fin de materializar, a partir de ellos, las correspondientes cimentaciones superficiales. Los reconocimientos efectuados han permitido establecer parámetros de diseño de las cimentaciones, según la aplicación de dos sistemas de modelación de la potencial superficie de rotura:

- Como un medio continuo. En tal caso, la base de cimentación se encuentra apoyada sobre una superficie de contacto que se localiza en proximidad del propio talud del emplazamiento. El modelo de cálculo empleado para la resolución de las cimentaciones en esta condición es el indicado en la Figura 11. Bajo esta forma de modelo de rotura la ecuación de determinación de la presión de rotura ( $q_u$ ), es la indicada como (1). Para su empleo los reconocimientos de la campaña permitieron la definición de parámetros resistentes (cohesión,  $c$  y fricción  $\phi$ ) del macizo rocoso continuo con un peso unitario medio ( $\gamma$ ), según el modelo de *Hoek (2007)*. Los coeficientes de contribución ( $N_{cq}$  y  $N_{\gamma q}$ ) se definieron en función del ángulo de fricción característico en el plano de apoyo.

$$q_u = c N_{cq} + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma q} \quad (1)$$

- Modelo de rotura sobre plano de discontinuidad. Para complementar el análisis anterior, la definición

de la presión de rotura admisible de cada una de las bases ha sido identificada en función de la disposición del sistema de discontinuidades menos favorable en el sitio de emplazamiento. En tal condición, el modelo de análisis aplicado, se base en el esquema indicado en la Figura 12. Dentro de este modelo la resistencia última al deslizamiento ( $\tau$ ) en el plano de discontinuidad ha sido valorada según el modelo de *Barton y Bandis (1982, 1990)*, indicado en la ecuación (2). La misma depende de la presión normal sobre el plano de deslizamiento ( $\sigma_n$ ), del ángulo de fricción de base de los bloques en contacto ( $\phi_b$ ), y de los parámetros de ondulación de la superficie ( $JRC$ ) y de resistencia a compresión simple de la junta ( $JCS$ ).

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2)$$

En función de los resultados obtenidos en ambos modelos, se adoptó el valor menor de resistencia para establecer la presión admisible de aplicación en el diseño de las correspondientes cimentaciones. Estos elementos permitieron el establecimiento de las dimensiones generales del cimiento en la etapa del proyecto ejecutivo y su validación y revisión en la etapa de desarrollo de la ingeniería de detalle de la obra.

Los resultados han sido finalmente complementados con la evaluación de potenciales procesos de inestabilidad general de la ladera dentro de la cual se inscribe cada uno de los puentes del sistema. En tal sentido, el diseño ha sido complementado con la realización de los correspondientes modelos de estabilidad de taludes basados en criterios de equilibrio límite clásicos (*Das, 2013*). A modo de ejemplo de uno de los casos evaluados, se presenta la Figura 13.

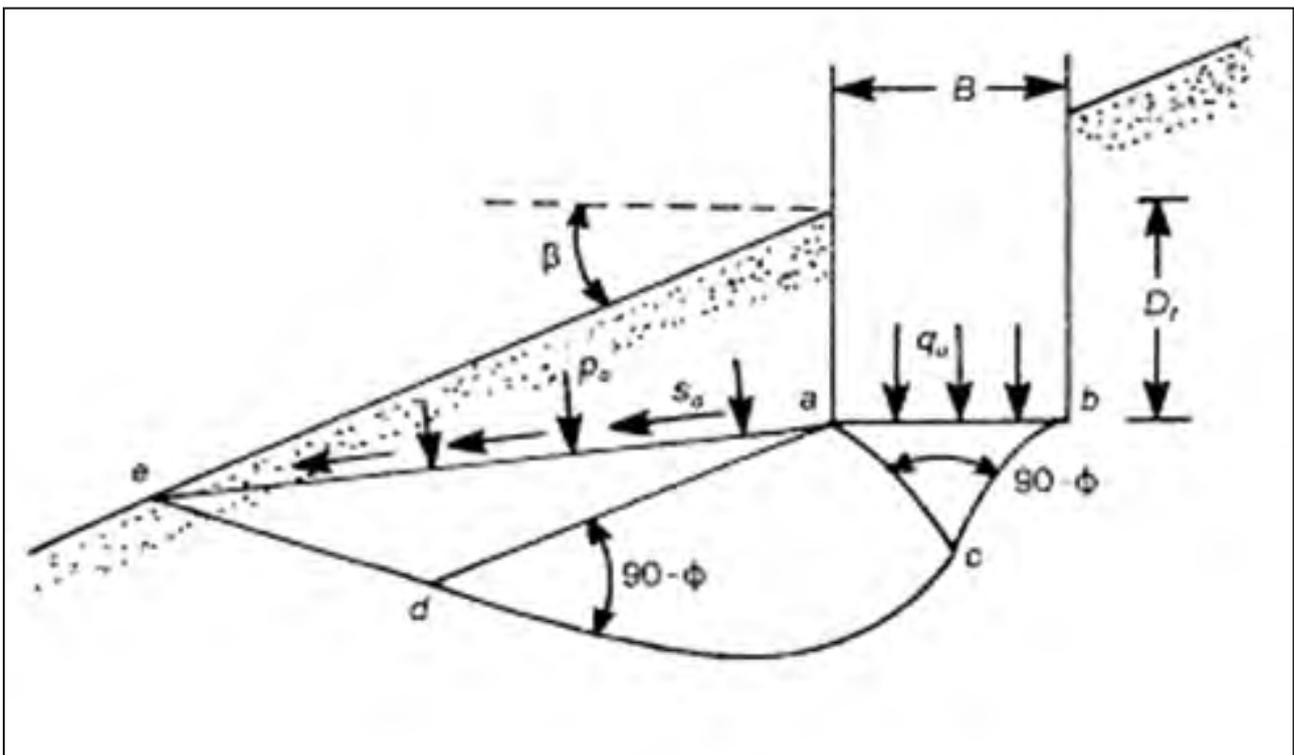


Figura 11. Esquema de modelo de rotura de la base superficial sobre medio continuo.

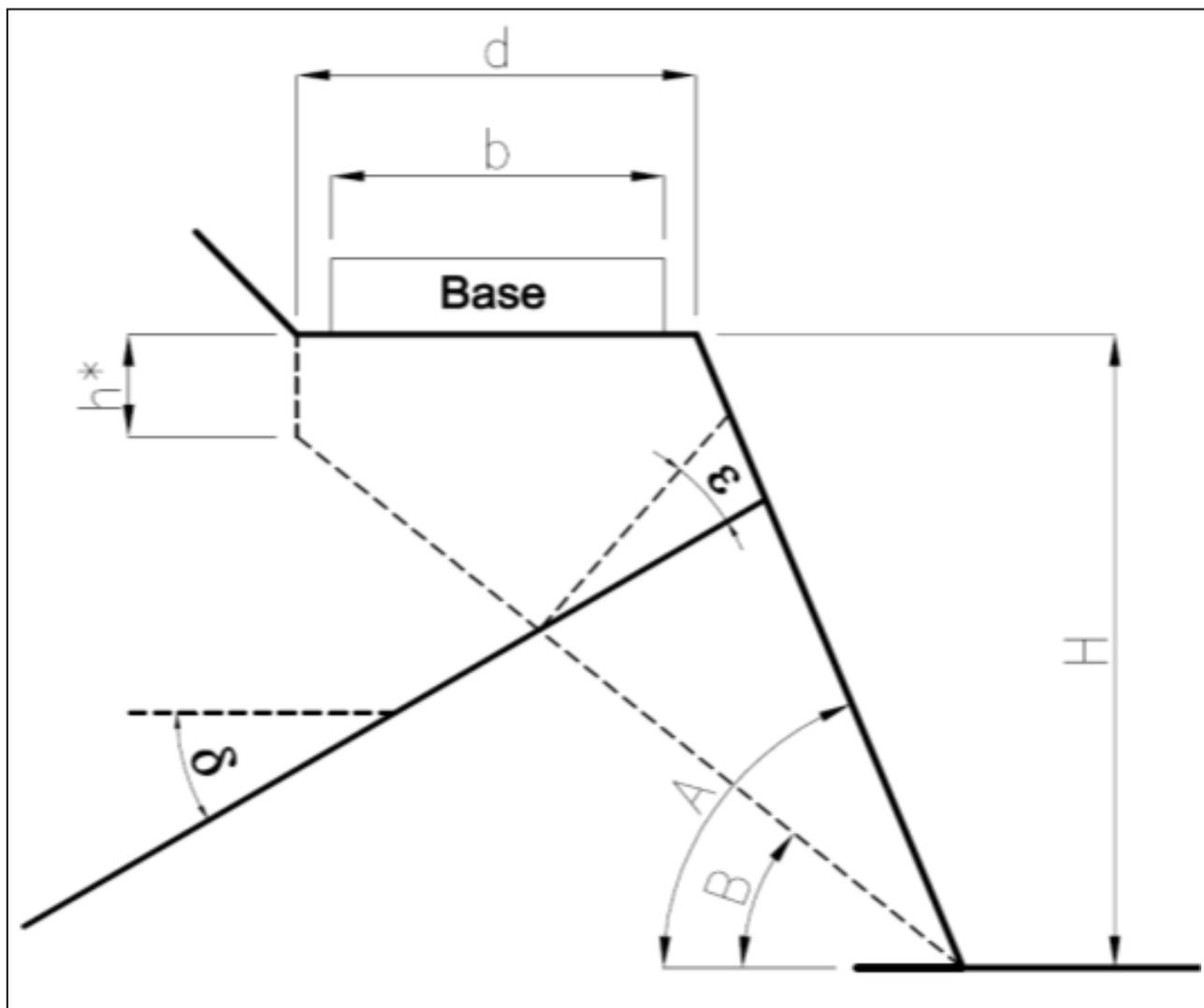


Figura 12. Esquema de cimentación superficial sobre modelo de rotura sobre plano de discontinuidad.

Las evaluaciones realizadas han sido empleadas para la revisión de la capacidad de carga del sitio de emplazamientos de los apoyos, o la potencialidad de desarrollo de superficie de falla por inestabilidad de ladera. Todo esto ha llevado a la conformación de un conjunto de escenarios de carga aplicables en cada punto de localización de cada elemento de cimentación. Los factores de seguridad aplicados, en virtud de las características propias de la obra han sido los siguientes:

- Respecto de la capacidad de carga de la base en proximidad de la ladera, 4.
- Respecto de la falla según una superficie de discontinuidad se consideraron dos escenarios. Bajo acciones frecuentes se aplicó un factor de seguridad igual a 2,50, en tanto que para condiciones extremos (incluyendo el sismo de diseño), el factor de seguridad es igual a 2,0.
- Respecto de la verificación de la estabilidad de la ladera modelada como medio continuo equivalente se consideraron tres escenarios. Los escenarios de operación normal, con un factor de seguridad requerido de 1,50; los escenarios inusuales, implicando la presencia de niveles freáticos elevados, con un factor de seguridad

de 1,20 y finalmente el escenario con aplicación del sismo de diseño, con un factor igual a 1,10.

Todos los análisis efectuados cumplieron adecuadamente con los factores de seguridad antes indicados. Estas modelaciones llevaron a la definición de los diversos elementos componentes del conjunto ladera cimentación, es decir: a. La localización a nivel de cota de la base de cimentación, b. Sus dimensiones a fin de soportar en forma adecuada los diversos escenarios de carga aplicados, c. Los requerimientos de trabajos complementarios de sostenimiento en los sitios de conformación de la base, d. La aplicación de componentes de mitigación de procesos de inestabilidad de la ladera, en varios casos establecida a través del empleo de anclajes pasivos, y de sistemas de protección de la superficie del talud mediante el empleo de hormigón proyectado y sistema de armadura de superficie

Si bien la concepción general de cimentación de los viaductos es a través de una tipología del tipo superficial, por razones de carácter geotécnico del sitio de emplazamiento, en uno de los puntos de apoyo se debió adaptar al diseño de una plataforma de soporte sostenida sobre un conjunto de pilares de cimentación. El tratamiento particular de este caso, dada su complejidad, no es objeto de esta presentación.

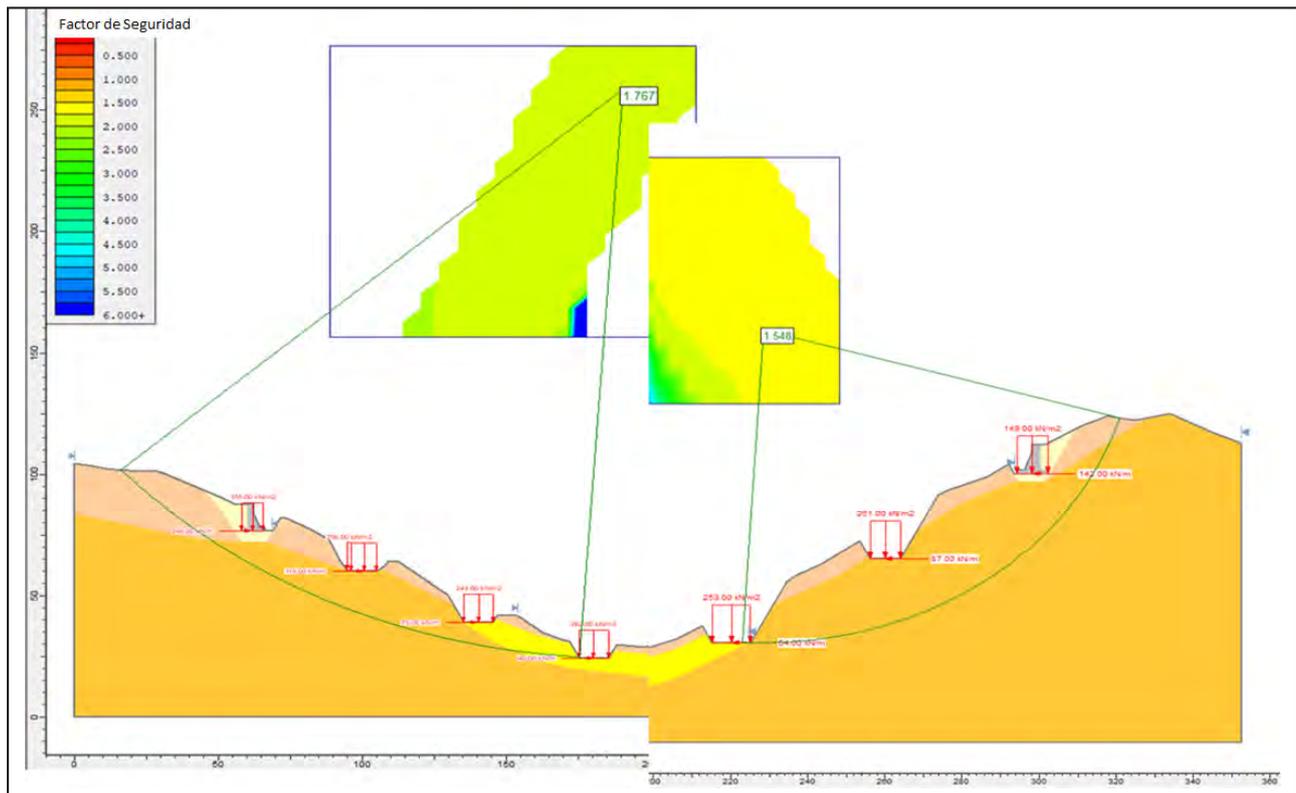


Figura 13. Representación esquemática de modelo de evaluación de estabilidad global de la ladera.

#### Etapa de construcción de la obra

Un aspecto que se destaca en el tratamiento dado a esta etapa de la obra es el hecho de haber considerado que el proyecto ejecutivo inicial debe ser permanente revisado en función de las condiciones locales que se aprecian durante la propia construcción. Como se ha indicado, en forma previa a la construcción se realizaron investigaciones geotécnicas para la definición de las cimentaciones a adoptar. Durante la ejecución de los trabajos de construcción se realizaron tareas de revisión e inspección de detalle del plano de apoyo logrado en cada punto de contacto de los puentes. La evaluación del plano de apoyo se ha efectuado mediante un relevamiento de detalle de la litología del sector y del propio sistema de discontinuidades del lugar. Previa a la ejecución del relevamiento se ha realizado la limpieza del plano de apoyo, para lo cual, concluidas las tareas de excavación mediante el empleo de equipamiento mecánico y voladuras localizadas, se ha procedido a la ejecución de la limpieza manual del plano alcanzado, tal como se muestra en la Figura 14.

Este relevamiento se ha empleado para establecer la condición de aprobación del plano de apoyo conformado o, eventualmente, la revisión de las condiciones generales de cálculo en el sector excavado. La Figura 15 muestra una vista de las labores que se han realizado inmediatamente alcanzado el plano de apoyo con las condiciones de calidad de roca pretendida. En vista de tratarse de un material con la posibilidad de desarrollo de procesos de meteorización de alta velocidad cuando la roca se pone en contacto con el ambiente, se estableció que, alcanzado el plano de apoyo, se debía ejecutar un bloque de hormigón a modo de base de asiento, con una calidad de hormigón similar a la resistencia propia del macizo rocoso.

Completadas las tareas de conformación de la superficie de apoyo de cada una de las bases de las pilas y los estribos, la plataforma de apoyo construida ha servido para la disposición de un sistema de anclajes pasivos con distribución regular, a modo de anclajes de consolidación del macizo rocoso en el sector inmediatamente próximo a la base. En varios casos, en función de la disposición observada en el sistema de diaclasado y discontinuidades de mayor magnitud se definieron posiciones y orientaciones complementarias en el sistema de anclaje. A modo de ejemplo de algunos de estos trabajos, se presenta la Figura 16, la cual muestra la disposición del equipo de perforación en el desarrollo de los trabajos de instalación de anclajes pasivos inclinados.

Sobre cada base de asiento así conformada se han materializado las correspondientes bases estructurales. A partir de estas estructuras se han construido los sistemas de monopilares de las pilas, empleando encofrados trepadores. Las estructuras correspondientes a los estribos fueron materializadas según procedimientos de encofrado, colocación de armadura y hormigonados convencionales.

Dentro de este proceso de construcción de la obra, un componente adicional que tuvo un tratamiento geotécnico particular fue el relacionado con la conformación del material de relleno de cada uno de los estribos. Los sistemas de absorción de esfuerzos sísmicos dispuestos para cada viaducto determinan que sobre los estribos se aplica la demanda de la mayor rigidez de contacto con el propio macizo rocoso.

Finalmente, la estructura superior del puente se constituyó mediante la utilización de una viga lanzadora, la cual se encargó de la disposición de las vigas prefabricadas de cada vano, con una longitud de 40 metros. La Figura 17 muestra la obra concluida en el sector.



Figura 14. Vista de trabajos de limpieza del plano de apoyo.



Figura 15. Vista del plano de apoyo de la cimentación cubierto con hormigón de base de asiento.



Figura 16. Vista de trabajos de anclaje inclinado en la conformación de la base de asiento del cimiento.



Figura 17. Vista general del sistema de viaductos.

## Conceptos derivados de la experiencia de construcción

En general, las etapas de desarrollo de una obra se interpretan como hechos secuenciales, y muchas veces como procesos estancos y aislados unos de otros (concepción general de la obra, anteproyecto, proyecto). Esta forma de interpretación del proceso puede ser de uso para la materialización de obras con un alto grado de estandarización, dentro de las cuales los proyectistas culminan sus trabajos en el instante en que emiten sus documentos de proyectos ejecutivos (especialmente a nivel de planos y especificaciones técnicas). Situaciones como las planteadas en el caso mostrado comprenden, como ocurre en otras tantas obras de ingeniería, prototipos en sí mismos, dentro de los cuales los componentes repetitivos y estandarizados se presentan con distintos grados de acotamiento. En el tratamiento del tema es necesario tener en consideración las dificultades que puede implicar la caracterización anticipada y definitiva de las condiciones de cimentación de estructuras como las aquí presentadas. En relación al material sobre el cual se trabaja, a diferencia de los materiales de construcción hechos por el hombre, como por ejemplo, el hormigón o el acero, los componentes geotécnicos (suelos y rocas) muestran singularidades que pueden derivar en la imposibilidad del establecimiento de un criterio único e inamovible para el tratamiento del cimiento.

El desarrollo de una obra como la presentada en los apartados anteriores permite, una vez concluida, la realización de un conjunto de apreciaciones que los autores consideran de interés para el tratamiento de los conceptos geotécnicos en ambientes como los aquí descritos. Tal como lo indica *Chartes (2004)*, la ingeniería del terreno se basa, esencialmente, en el aporte profesional de geólogos e ingenieros. El tratamiento de estos casos implica la interacción entre varias disciplinas científicas: la ingeniería geológica, la ingeniería geotécnica aplicada a la mecánica de suelos y rocas, la ingeniería estructural. En consecuencia, la interrelación de las distintas actividades dentro de una obra de ingeniería demanda la visión multitemática de la construcción.

En obras de dimensiones medias a grandes, la intervención de grupos multitemáticos se muestra con mayor evidencia. En procesos como los aquí presentados intervienen profesionales proveniente de diferentes disciplinas y con diversas formaciones. Una primera división puede distinguirse entre los profesionales de gabinete y los obra. Cabe preguntarse en este punto, si estas son actividades que pueden operar en forma aislada una de otra, y cuáles son los alcances de cada una de ellas.

Los profesionales que desarrollaron los estudios en gabinete han consistido en aquellos que tratan los aspectos del diseño geométrico y estructural vial, hidráulicos, geológicos geotécnicos y estructurales específicos. El ejemplo aquí presentado muestra que, además de la necesidad de contar con grupos de trabajo con experiencia en la temática, es absolutamente necesaria la interrelación entre ellos. Cualquiera de los aspectos en los que se interviene para la definición de un componente del proyecto sin duda influye, con distintos grados de importancia, en otros elementos del sistema.

Los profesionales de la obra tienen un papel de alta trascendencia en la adecuada materialización de lo proyectado. Su participación involucra la correcta interpretación de la información recibida y la disposición de una organización satisfactoria de sus propios recursos para atender a la materialización de los componentes propuestos. En este punto, aquellos encargados de los controles de calidad tienen una función de gran importancia.

Uno de los grandes desafíos en una encomienda como la presentada es lograr una "obra materializable". Esto significa que la misma sea proyectada para cumplir con los objetivos pretendidos por el propietario a través de la consecución de un conjunto de acciones que se materialicen en un orden adecuado y según tecnologías confiables. Esta condición sólo puede ser alcanzada a través de la interacción entre los profesionales de gabinete y los de obra. Esta interacción se manifiesta con diversas intervenciones según las etapas propias de la obra.

Dentro de este proceso de interacción entre los encargados del proyecto ejecutivo y la ingeniería de detalle y el propio equipo de construcción surgen algunas de las preguntas que deben formularse, tales como: a. ¿Cómo cumplir el objetivo pretendido con la tecnología de la que se puede disponer?, atendiendo al concepto de administración de los recursos limitados en la materialización de una obra; b. ¿Cuál debería ser la secuencia de construcción para evitar situaciones de incompatibilidad en la producción de componentes?, lo cual muchas veces implica acciones condicionadas por la accesibilidad a los sitios de trabajo, o por condicionantes ambientales y climáticas; c. ¿Se dispone de planes de acción alternativos, especialmente si se concluye que las hipótesis originales formuladas no son válidas, total o parcialmente?, lo que evidencia la necesidad de la interacción permanente entre los equipos de proyecto y los encargados de la construcción.

En consecuencia, y como se indicó antes, especialmente en la instancia de la ingeniería de detalle, el ajuste de los componentes de proyecto y la adecuación de los mismos a la potencialidad tecnológica disponible debe ser realizada en forma conjunta entre los profesionales técnicos de diseño y los encargados de la materialización. Ambas partes proponen y escuchan las posibilidades y las limitaciones de las acciones. Una buena conceptualización de esta interrelación establece como primer resultado una propuesta de acción con una alta adaptación a las posibilidades reales del constructor, y con esto establece una primera acción en pos de un resultado satisfactorio en la obra.

Durante la etapa de construcción, y especialmente en el caso de obra con altos contenidos geotécnicos en su tratamiento, el concepto anterior de interacción debe mantenerse. En esta etapa las preguntas especiales pueden ser: a. ¿Cómo deben ser los sistemas de control de los productos?, de forma tal que los mismos pueden ser adecuadamente ejecutados, sin producir alteraciones significativas en los ciclos de operación de la construcción; b. ¿En qué instancia de la obra debe validarse determinadas hipótesis?, estableciendo el sistema de evaluación y ensayo por medio del cual se confirma o rectifica una hipótesis. Los trabajos de materialización de la obra requieren una revisión de las hipótesis de diseño, y la comunicación entre los profesionales de la obra y los diseñadores. Este proceso ha sido planteado como un tratamiento clásico por parte de *Peck (1969)*, en la definición del Método Observacional. El seguimiento de la evolución de la obra, la verificación de las hipótesis de diseño o su rectificación según los resultados de observaciones o controles programados es un aspecto que influyen en la obtención de productos adecuados.

Dentro de este análisis, no se puede olvidar al equipo profesional que cumple las funciones de representación de propietario, la inspección con plantel propio o contratado. La posición que este componente asume durante el desarrollo de las tareas es de igual trascendencia respecto de los otros dos componentes. Una inspección de obra que no asume una actitud proactiva en la materialización del proyecto puede

determinar la toma de posiciones excesivamente conservadoras en el planteo de soluciones, o llevar a situaciones de alta conflictividad en el logro de los objetivos pretendidos. Durante el desarrollo de la construcción los grupos de inspección deben tener una posición igualmente de control del buen hacer, así como de contribución a la disposición de las acciones más beneficiosas para la obra. En el caso de componentes geotécnicos, en vista de las limitaciones de conocimiento previo, por más intenso que se haya procurado, y especialmente en ambientes de alta heterogeneidad como los aquí mostrados, la inspección debe valorar junto con los otros equipos técnicos las singularidades encontradas y colaborar con su experiencia en la toma de decisiones de acción inmediata, cuando así lo demanda la situación alcanzada. Indudablemente, para lograr estas condiciones es necesario contar con técnicos de experiencia en el grupo de trabajo.

La auscultación de obra es un elemento no siempre adecuadamente valorado, pero que debería ser potenciado en vista a la ayuda que presenta para el producto logrado, su buen hacer, el conocimiento sobre los comportamientos de materiales y la utilización de los resultados en la validación o rectificaciones de sus propias acciones. Finalmente, es importante considerar que el componente de auscultación no sólo es un elemento de apoyo durante el propio proceso de construcción. La disposición de elementos de control de los distintos componentes de la estructura, que operen a lo largo de la vida útil de la obra conforma un aspecto que debe ser interpretado como una valiosa contribución a la revisión periódica del adecuado comportamiento de la obra.

El concepto final que queda asociado con la realización de este tipo de obras es el vinculado con el mantenimiento. Como toda obra vial una parte importante a conservar es la superestructura vial, la calzada. Sin embargo, en este caso,

los componentes de infraestructuras son especialmente importantes, por lo cual la formulación de un plan de mantenimiento y conservación, con inspecciones rutinarias tanto en el cimientado, como en las estructuras inferiores de puentes, sectores de laderas sostenidas o sistemas de drenaje, es de especial importancia para el adecuado funcionamiento del conjunto de la estructura.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al personal técnico de la Empresa Constructora Chediack Britos, U.T.; y el encargado de la inspección por parte de la Dirección Provincial de Vialidad. En todo momento estos profesionales han mostrado una actitud proactiva para la resolución de las situaciones inicialmente no contempladas. Adicionalmente, el agradecimiento a los equipos técnicos de las oficinas de proyecto de ZCI Consultores de Ingeniería e Ingroup Oficina de Proyecto, por su intervención en el desarrollo de la ingeniería de proyecto y detalle.

### Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Marcelo E. Zeballos y Carlos F. Gerbaudo. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Marcelo Zeballos y el coautor comentó las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

### Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

### Referencias bibliográficas

- Informe Geotécnico. Relevamiento Geológico-Geotécnico y Evaluación de Taludes de Corte – Ruta Provincial N° 34 (Camino de las Altas Cumbres). Progresivas 6+150 a 6+450.* (2015, mayo). AbyaTerra SRL.
- Barton, N.R. y Bandis, S.C. (1982). Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. En *Actas Proceedings of the 23rd. Symposium on Rock Mechanics* (pp. 739-760). University of California.
- Barton, N.R. y Bandis, S.C. (1990). Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. En N. Barton y O. Stephansson (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on Rock Joints* (pp. 603-610). Balkema.
- CIRSOC 103 (2005). *Reglamento Argentino para Construcciones Sismoresistentes*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Chasrtes, R. (2004). *Professional tasks, responsibilities and co-operation in ground engineering*. ISSMGE.
- Das, B.M. (2013). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. (4a ed.). Cengage Learning.
- Deere, D. U. y Deere D. W. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) after twenty years, Contrat Report GL 89-1*. US Army Engineering Waterways Experiment Station.
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses.. *Géotechnique*, 23(3), 187-223.
- Hoek, E. (1994). *Strength of rock and rock masses*. *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- Hoek E. y Diederichs, M. (2006). Empirical estimates of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203–215.
- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering. Hoek's Corner. <https://www.rocksience.com/learning/hoek-corner>
- Hoek, E. y Brown, E.T. (1997). Practical Estimated Rock Mass Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics*, 34(8), 1165-1186.
- Marinos, P., Hoek, E. y Marinos, V. (2006). Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: The case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 129-142. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-005-0018-x>
- Martino, R., Guerreschi, A. y Carignano, C. (2012). Influencia de la neotectónica preandina sobre la tectónica andina. El caso de la Falla de las Sierras Chicas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69 (2), 207-221.

- Peck, R.B. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique*, 19(2), 171-187. <https://doi.org/10.1680/geot.1969.19.2.171>
- Rocca, J., Decanini, L. y Prato, C. (1991). Riesgo sísmico en el valle longitudinal de las Sierras de Córdoba. *Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*, 1, 136-153.
- Rocca R. J. (2008) Actualización de la percepción del Riesgo Sísmico en el Valle longitudinal de las sierras de Córdoba. Argentina. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 8 (1), 71-88.
- Siegesmund, S., Steenken, A., Martino, R., Wemmer, K., Lopez de Luchi, M., Frei, R., Presnyakov, S. y Guerreschi, A. (2010). Time constraints on the tectonic evolution of the Eastern Sierras Pampeanas (Central Argentina). *International Journal of Earth Sciences*, 99(6), 1199-1226. <http://dx.doi.org/10.1007/s00531-009-0471-z>
- WRA. (2019). *Catálogo de Riesgo de Proyecto*. PIARC. <https://www.piarc.org/es/pedido-de-publicacion/30967-es-Cat%C3%A1logo%20de%20riesgos%20de%20proyectos>

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>  
Cisneros Basualdo, N. E., Banda Noriega, R.B., Miguel, R.E. Rodríguez, C.I. y Ruiz de Galarreta, V.A.  
Peligro de contaminación del agua subterránea por sistemas de lagunas para tratamiento de efluentes de tambos  
e004, <https://doi.org/10.59069/24225703e004>

# Peligro de contaminación del agua subterránea por sistemas de lagunas para tratamiento de efluentes de tambos

## Groundwater contamination hazard by lagoon systems for effluent treatment from dairy farms

 Nicolás Eloy Cisneros Basualdo<sup>1,2\*</sup>   Roxana Bettina Banda Noriega<sup>1</sup>   Roberto Esteban Miguel<sup>3</sup>   
 Corina Iris Rodríguez<sup>1,4</sup>   Víctor Alejandro Ruiz de Galarreta<sup>1</sup> 

\* Autor de contacto

Recibido: 08 de noviembre de 2022 • Aceptado: 17 de abril de 2023 • Publicado: 24 de julio de 2023

### Resumen

El ordeño bovino en tambo es una de las principales actividades primarias en la provincia de Buenos Aires. Abastece al mercado interno y externo de leche cruda y derivados. La cuenca lechera Mar y Sierras abarca 68.267 km<sup>2</sup> del sudeste de la provincia, y en el último registro del año 2013 contaba con 182 tambos. El proceso de ordeño genera un efluente líquido con alta carga orgánica que debe ser tratado previo su vuelco. El sistema más utilizado por los productores es el de lagunaje. Sin embargo, su diseño y construcción no son adecuados o presentan fallas. Debido a la diversidad regional del medio físico, se requiere de herramientas para evaluar la peligrosidad de que el recurso hídrico subterráneo sea contaminado por esta actividad. El objetivo del trabajo fue evaluar el peligro de contaminación del agua subterránea por el uso de sistemas de lagunas para tratamiento de efluentes de tambos en el sudeste bonaerense. Se aplicó el método GOD para determinar la vulnerabilidad del acuífero y estimar índices de carga contaminante (ICC) en cinco campos con siete tambos de distintas escalas productivas y ubicadas en sitios con diversas características. Los sitios mostraron peligrosidad 'Elevada' y 'Moderada' de contaminación. Los tambos familiares, aunque presentaron menor ICC, se ubicaban en sitios con alta vulnerabilidad, mientras que los tambos de mayor escala, con alta carga contaminante, se situaron en áreas de menor vulnerabilidad. Estos análisis colaboran en la prevención y categorización del peligro de contaminación del recurso hídrico subterráneo por la actividad de tambos.

**Palabras clave:** carga contaminante, producción lechera en tambo, recurso hídrico subterráneo, vulnerabilidad.

1. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Humanas, Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (CINEA).
2. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICPBA)
3. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Catamarca La Rioja, Estación Experimental Agropecuaria Chilecito.
4. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## Abstract

Dairy farms are one of the main primary activities in Buenos Aires province. It supplies the local and foreign markets with raw milk and derivatives. The 'Mar y Sierras' dairy basin extends over 68,267 km<sup>2</sup> of the province's southeast. 182 dairy farms in activity were registered in 2013. The milking process generates a liquid effluent with a high organic load that must be treated prior to dumping. The most used system by producers is that of lagooning. However, its design and construction are not adequate or have flaws. Due to the regional diversity of the physical environment, tools to assess the danger of the groundwater resource being contaminated by this activity are required. The aim of this work was to evaluate the danger of groundwater contamination due to lagoon systems for effluent treatment from dairy farms in the southeast of Buenos Aires. The GOD method was applied to assess the vulnerability of the aquifer and to estimate pollution load indices (PLI) in five fields with seven dairy farms of different production scales located in sites with different characteristics. The farms showed 'High' and 'Moderate' danger of contamination. The family-scale dairy farms, although they presented lower PLI, were located in sites with high vulnerability, while the larger-scale dairy farms, with a high pollutant load, were located in areas of less vulnerability. These analyzes collaborate in the prevention and categorization of the danger of contamination of groundwater resource due to dairy farms.

**Keywords:** pollution load, dairy farms production, groundwater resources, vulnerability.

## Introducción

El ordeño bovino en tambo aprovecha los procesos fisiológicos de parto y lactancia de mamíferos rumiantes (vacas) para la obtención de leche cruda como producto para consumo humano o como insumo para la elaboración de derivados lácteos.

Esta es una de las principales actividades primarias en Argentina, la cual abastece de leche cruda al mercado interno y externo. Según datos de la Fundación para la Promoción y el Desarrollo de la Cadena Láctea Argentina (FunPel), en 2021 se alcanzó una producción nacional de 11.553 millones de litros de leche, lo cual representó un crecimiento interanual de 3,4% respecto a 2020. Esta productividad resulta de una serie de estrategias económicas que se implementaron desde la década de 2000, con el objetivo de impulsar la industria láctea en el mercado internacional. La inclusión de nuevas técnicas y tecnologías en el sector significó un aumento en el volumen de leche extraída por animal en un menor número de establecimientos (Mancuso y Teran, 2008). La falta de infraestructura para afrontar este aumento productivo trajo asociado un incremento en los impactos ambientales generados, evidenciado por un aumento en los problemas con la calidad del agua, mayor recurrencia de enfermedades en los animales (p.ej. mastitis), falta de adecuación a normativas vigentes (García *et al.*, 2011), entre otros.

La actividad de tambo en Argentina se divide administrativamente en 'cuencas' lecheras que reúnen productores regionales con similares intereses y dinámicas socio-productivas. Dentro de la provincia de Buenos Aires se destaca la cuenca administrativa de 'Mar y Sierras', la cual abarca 68.267 km<sup>2</sup> sobre el sudeste del territorio (e incluye parte de diferentes cuencas hidrográficas). Los últimos datos disponibles respecto al número de establecimientos en la cuenca lechera Mar y Sierras son del año 2013. En tal sentido, la cuenca contaba con 182 tambos que representaban el 7,10 % de los tambos bonaerenses (FunPel, 2013).

El ordeño bovino requiere del uso de importantes volúmenes de agua, principalmente para el preenfriamiento de la leche (proceso vital para el control microbiológico de la leche) y la limpieza de maquinarias e infraestructura. La principal fuente de abastecimiento es el recurso hídrico subterráneo, debido a las reservas disponibles, los bajos costos de extracción y mantenimiento, y su temperatura estable a lo largo del año acorde a los procesos de intercambio térmico con la leche.

En el proceso de limpieza se genera un efluente con alta carga orgánica (purín) proveniente de desechos animales que debe ser gestionado y tratado correctamente. Según la Encuesta Sectorial Lechera de INTA (Gastaldi *et al.*, 2020), el 83% de los establecimientos optó por el sistema de lagunas para manejar dichos residuos. Sin embargo, esta práctica no se realiza en forma adecuada en la mayoría de los tambos bonaerenses. Esto representa una amenaza como fuente potencial de contaminación hacia el recurso hídrico utilizado para consumo humano, animal y productivo.

La evaluación del peligro de la contaminación de un acuífero resulta una herramienta esencial para la gestión de los recursos hídricos subterráneos y la planificación territorial (Grondona *et al.*, 2013). Este peligro se estima a partir de la interacción entre una carga contaminante volcada por determinada actividad humana y la vulnerabilidad del acuífero según sus características hidrogeológicas (Foster e Hirta, 1988).

Cada contaminante debe ser analizado de forma independiente, debido a las características fisicoquímicas que puedan afectar la dinámica, transporte y/o retardo en el perfil edáfico. La evaluación puede realizarse de diversas maneras, aunque por lo general se contempla la clase y carga hidráulica del contaminante, modo y tiempos de disposición en el terreno (Foster *et al.*, 2002; Zaporozec *et al.*, 2002).

Los métodos paramétricos para la estimación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos pueden dividirse en

tres grandes grupos (Barbulescu, 2020): los sistemas matriciales (ejemplo Matriz de Riesgo de La Manna y Malcuori, *et al.*, 2012), de sumas ponderadas (DRASTIC de Aller *et al.*, 1987) y de rating. Dentro de este último grupo, la metodología propuesta por Foster e Hirata (1988), denominada GOD (según las siglas en inglés), estima la probabilidad de que el recurso hídrico subterráneo sea contaminado por compuestos de origen antrópico en concentraciones que superen las recomendadas por la Organización Mundial de la Salud, para calidad de agua potable (OMS, 2006). En 2002, los autores publicaron una actualización de la metodología donde se agregó el suelo como un componente más para determinar la vulnerabilidad del acuífero.

El método GOD presenta como ventaja el escaso número de parámetros a relevar para cada sitio y la sencillez operativa al momento de su aplicación, sin dejar de contemplar el comportamiento hidráulico y características de los acuíferos a evaluar (Auge, 2007). Esto permite realizar un análisis comparativo de las actividades antrópicas en una región determinada.

En el sudeste bonaerense, por ejemplo, se ha aplicado en numerosos trabajos para evaluar la peligrosidad de actividades industriales y su potencial afección al acuífero (Ruiz de Galarreta *et al.*, 2004; Miguel, 2009; Lexow *et al.*, 2016; Ruffo *et al.*, 2019). Sin embargo, no se encontraron antecedentes de aplicación en la actividad de ordeño bovino.

No corresponde a este trabajo incluir un debate respecto al uso de conceptos de 'Peligro' o 'Riesgo' de contaminación de un acuífero. Tal como lo aclara Foster *et al.* (2002), en adelante se considerarán ambos conceptos como la posibilidad de que una sustancia alcance el recurso hídrico subterráneo utilizado para consumo humano y productivo. Por tal motivo en este trabajo se entenderán como conceptos equivalentes.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el peligro de contaminación hídrica por la actividad de tambo en el sudeste bonaerense. Con el propósito de aportar una herramienta a los tomadores de decisión para priorizar acciones paliativas o preventivas en la actividad de tambo.

## Metodología

### 2.1 Selección de predios

A partir de la caracterización general de la cuenca lechera Mar y Sierras, sus particularidades y variaciones físico-naturales y socioeconómicas, se seleccionaron cinco campos característicos. Debido a la ausencia de una base de datos completa y actualizada sobre los tambos en actividad, se optó por ponderar factores que diferencien la dinámica productiva de los establecimientos, con especial énfasis en la relación con el recurso hídrico superficial y/o subterráneo. Con esto se buscó hacer un trabajo en detalle de los establecimientos que pertenecen a la cuenca bajo estudio.

### 2.2 Relevamiento de información en campo

A partir de fuentes primarias y secundarias se realizó una caracterización con un enfoque integral de la dinámica productiva en la cuenca lechera 'Mar y Sierras'. Se identificaron las regiones hidrogeológicas según Auge (2004), así como áreas de recarga, transición y descarga del recurso hídrico subterráneo a escala provincial.

En los campos seleccionados, se relevó información productiva y de infraestructura mediante visitas a los tambos, acompañando las actividades de ordeño. Esta información se complementó con entrevistas a actores clave (Valles, 1999), productores y tamberos.

En adición, se caracterizó el proceso productivo, el uso del agua y la gestión de los efluentes. Se midieron caudales volumétricos por etapa y se calculó el balance hídrico en la actividad. Se realizó una toma de muestra compensada de los efluentes generados durante las etapas de ordeño y lavado, adaptando la metodología de Taverna *et al.* (2014). En un laboratorio privado se analizó su composición fisicoquímica de acuerdo con la normativa provincial vigente. Dentro de los elementos determinados se puso especial atención en la concentración de nitrógeno total y nitrógeno total Kjeldahl.

La carga hidráulica del efluente se calculó según la Ecuación 1. El caudal diario de residuos generado por día se dividió por el área de aplicación. Se consideró también el aporte aproximado de la infiltración natural de la precipitación para el lugar, para lo cual se consideró la precipitación media diaria y un porcentaje de infiltración proporcionada por el balance hídrico regional.

Ecuación 1: Cálculo de carga hidráulica

Carga hidráulica:  $(Q(\text{m}^3/\text{día})/\text{Sup}(\text{m}^2) * 1000) + \text{Inf nat de la Pp med}(\text{mm}/\text{día})$

Donde: Q – Caudal de efluente; Sup – Superficie de lagunas o piletas; Inf nat de la Pp med – Infiltración natural de la precipitación media anual, dividida por 365 días del año.

El aporte final de nitratos con potencial de alcanzar el recurso hídrico subterráneo dependerá de la gestión realizada sobre los efluentes en cada establecimiento y los procesos fisicoquímicos y microbiológicos con relación al ciclo del nitrógeno in situ.

Acorde con otros antecedentes (Suzuki *et al.*, 1992; Wang *et al.*, 2010; Mienis y Arye, 2018), Foster e Hirata (1988) plantean la dificultad de establecer un valor de remoción debido a la incertidumbre en los procesos involucrados. Sin embargo, consideran posible un rango de lixiviación entre el 20 al 60% del nitrógeno total volcado.

Para el presente trabajo, se tomó una postura conservadora en los porcentajes de remoción. En aquellos sitios con serie de lagunas, se estimó un 28% de transformación del Nt (orgánico más amoniacal) volcado a ion nitrato con potencialidad de percolar hasta el recurso subterráneo. Donde se dispone en suelo, se tomó una remoción del orden del 60% a la especie oxidada  $\text{NO}_3^-$  de acuerdo con Foster e Hirata (1988).

Los suelos en cada sitio se describieron, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), a partir del análisis de la capa vectorial de suelos de INTA (1994) de escala 1:50.000 y de la información detallada para cada unidad cartográfica, disponible en la página web.

Para cada establecimiento se hizo un censo de pozos preexistentes dentro y en las inmediaciones de los campos. Se relevó tipo de bomba instalada, datos de construcción (si los dueños contaban con esa información), antigüedad, entre otros. En cada uno de ellos se midió la profundidad del agua subterránea con una sonda piezométrica con frecuencia estacional durante un ciclo hidrológico (2018-2019). Asimismo, tomaron muestras de agua subterránea para determinar concentración de nitratos y cloruros en los pozos usados para la producción y en un pozo aledaño ubicado aguas arriba, a modo de referencia.

## 2.3 Método GOD

### Carga contaminante

Según Foster y Hirata (1988), el Índice de Carga Contaminante (ICC) se estima en base a cuatro características semi-independientes de la carga contaminante generada por la actividad de tambo.

a) la clase de contaminante involucrado ( $I_A$ ): se obtiene a partir la tendencia a la degradación o transformación in situ del contaminante seleccionado y su retardación respecto al flujo de agua durante la percolación;

b) la intensidad de la contaminación ( $I_B$ ): se define a partir de la concentración relativa del contaminante según valores guía recomendados por OMS y la proporción de la recarga local de agua subterránea afectada por el vuelco del contaminante. Este trabajo consideró la concentración del contaminante en el efluente a partir del aporte de la carga orgánica propia de la actividad de tambo. No se incluye la concentración del elemento presente en el agua de abastecimiento al establecimiento, cuya fuente es el recurso hídrico subterráneo.

c) el modo de disposición en superficie o subsuelo ( $I_C$ ): surge a partir de la carga hidráulica del vuelco y la profundidad bajo superficie a la cual el efluente es dispuesto;

d) el tiempo de aplicación de la carga contaminante ( $I_D$ ): se define de acuerdo a la probabilidad de que el contaminante sea descargado y el tiempo de duración del mismo.

A cada una de ellas, se le asigna un valor entre 0 y 1 según su grado de amenaza. De acuerdo al método original, el ICC se obtiene a partir de la situación más desfavorable calculado para cada establecimiento. Sin embargo, para este trabajo se aplicó la propuesta de Lexow *et al.* (2016) y Ruffo *et al.* (2019), quienes lo obtienen a partir de la sumatoria de cada una de las características y su multiplicación por un factor de homogeneización de 0,25.

### Vulnerabilidad del acuífero

El índice de vulnerabilidad del acuífero parte del análisis de cuatro componentes principales a los cuales se le asigna un valor de coeficiente entre 0 y 1: distancia al agua subterránea (G), ocurrencia del recurso o grado de confinamiento del acuífero (O), características del sustrato litológico (D) y características de los materiales en la zona no saturada en suelo (S). De su multiplicación (Ecuación 2), se obtiene el índice de vulnerabilidad para cada sitio.

Ecuación 2: Vulnerabilidad del acuífero

$$\text{Vulnerabilidad del acuífero} = G * O * D * S$$

### Peligro de contaminación de agua subterránea

La metodología asigna un índice numérico entre 0 y 1 para ambos parámetros (vulnerabilidad y carga contaminante), en base a las características de sus componentes. De su entrecruzamiento (Figura 1) se obtiene el valor final asignado al peligro de contaminación del acuífero.

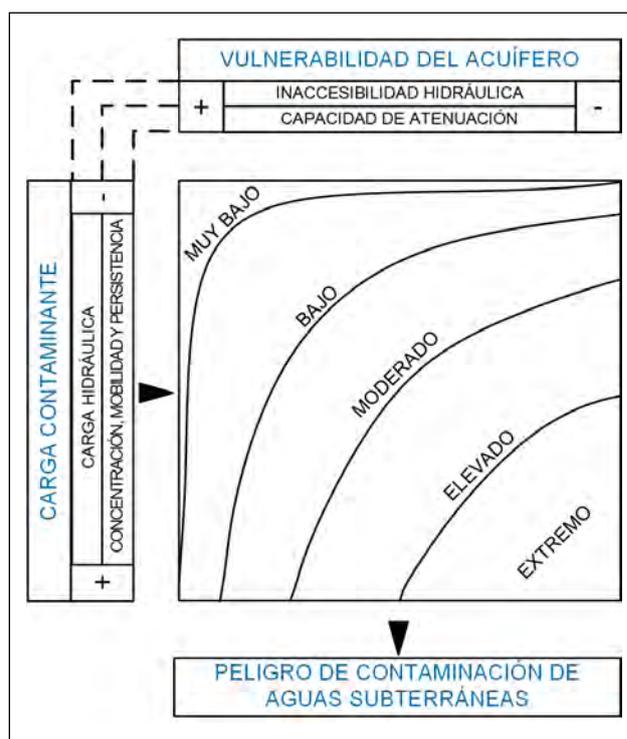


Figura 1: Esquema conceptual del peligro de contaminación de aguas subterráneas (Fuente: Foster et al., 2002)

## Resultados y discusión

### 3.1 Breve caracterización del medio físico del sudeste bonaerense

El sudeste de la provincia de Buenos Aires presenta un clima de tipo subhúmedo húmedo (B2) según la clasificación de Thornthwaite-Mather.

El balance hídrico modular para la ciudad de Tandil en el período 1900-2016 (Cifuentes *et al.*, 2022), mostró una precipitación media anual de 849 mm, una evapotranspiración potencial (EVTp) de 729 mm/año y una real (EVTr) de 703 mm/año. Los meses de diciembre, enero y febrero (de mayor temperatura media) presentaron déficit hídrico, y los meses de mayo a noviembre registraron excesos hídricos que alcanzaron 146 mm/año.

El sudeste de la provincia de Buenos Aires se caracteriza por la presencia de las Sierras Septentrionales (Tandilia) que atraviesan la llanura pampeana en sentido NO a SE. Alcanza aproximadamente unos 340 km de largo y 60 km en su corte más ancho, con alturas máximas de ≈500 m s.n.m. en la parte central del cordón serrano.

Todos los sitios comparten características geológicas similares en su perfil estratigráfico, aunque variando en su profundidad. En el sector costero, el horizonte medanoso resulta de mayor tamaño. Sin embargo, el área de estudio se encuentra en una zona de transición con la región interserrana y pedemontano (IP), con el cual comparte características.

Específicamente, Teruggi y Kilmurray (1975, 1980) realizaron un análisis completo de la composición y estructura geológica del basamento cristalino del sector de Tandilia. Se lo caracterizó como típico del sistema de montañas en bloques, separados y alineados por fallas. Sufrió procesos de meteorización y erosión, y durante el precámbrico superior se depositaron sedimentos de cuarcitas, calizas y arcillas.

La columna estratigráfica del Precámbrico sedimentario de Tandilia se puede visualizar en la Figura 2.

La orogénesis andina en el Terciario reactivó las fallas regionales de la región de llanura, lo cual produjo ascensos y

descenso de bloques que configuraron la morfología del Basamento y el zócalo del área ubicada al NE de las Sierras. La erosión pliocena cuaternaria suavizó el relieve ayudado por la acumulación de depósitos eólicos cuaternarios. A fines del Cuaternario, se produjo el último episodio deposicional bajo la forma de un manto loessoides de pocos metros de potencia que cubrió las llanuras aluviales y las superficies ligeramente inclinadas de relieve tabular. En las laderas, entre tanto, se produjeron acumulaciones de detrito de falda (Teruggi, 1974).

La formación de los suelos en superficie se corresponde con la situación de la pampa húmeda bonaerense, la cual se caracteriza por la deposición eólica y fluvial de sedimentos limosos y limo-arenosos del cuaternario (“limos loessoides pampeanos”) provenientes de zona cordillerana.

Según la zonificación hidrogeológica de Buenos Aires (Auge, 2004), el área de estudio incluye principalmente tres regiones: Serranías (SE) e Interserrano y pedemontano (IP), principalmente, y Costero (CO) en menor superficie.

### 3.2 Establecimientos seleccionados

Se seleccionaron cinco establecimientos con siete tambos en total (Figura 3). Estos son:

Sitio 1: Ubicado en el partido de Lobería, en proximidades del pueblo de Napaleofú. Se encuentra sobre un sector de serranía. Este establecimiento de escala productiva empresarial cuenta con dos tambos bajo su gestión (Tambo 2 y Tambo 3);

Sitio 2: Se encuentra en el partido de Benito Juárez, a escasos kilómetros al oeste de la ciudad homónima. Es un emprendimiento de escala familiar con vistas a suplantar cantidad de animales bajo ordeño por la fabricación de derivados lácteos in situ. Hidrogeológicamente, se ubica en una zona de piedemonte.

Sitio 3: Análogo al anterior, es un tambo de escala familiar ubicado en el partido de Ayacucho. Se encuentra en una zona de transición interserrana.

Sitio 4: Establecimiento de escala empresarial, cuenta con dos tambos en actividad (Tambo Grande y Tambo Chico). Se ubica dentro del partido de Tandil, en proximidades del paraje de La Pastora. La extensión del campo incluye una zona de transición entre la región serrana e interserrana, con una marcada topografía y ondulaciones;

Sitio 5: Se encuentra en zona periurbana de la localidad de Orense. Es un emprendimiento de escala intermedia. Se encuentra en el límite entre las regiones interserrana y de costa.

### 3.3 Datos productivos de los establecimientos

Las Tablas 1 y 2 presentan una síntesis de aspectos clave de infraestructura, procesos productivos de los sitios bajo

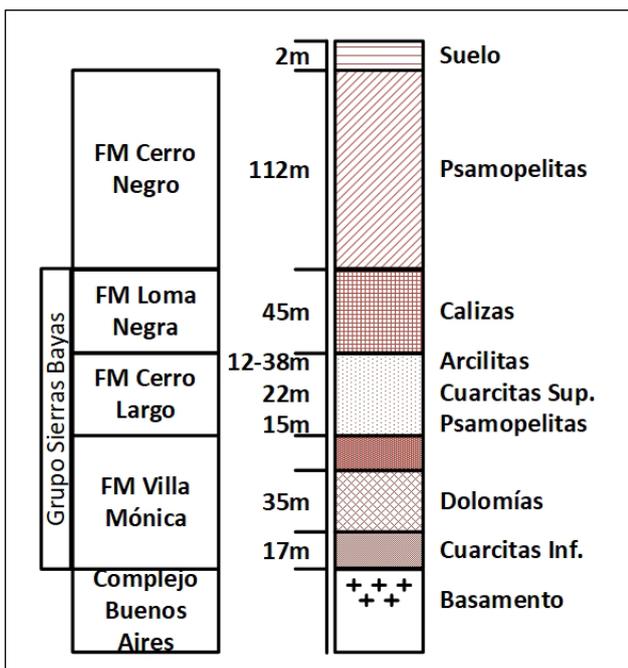


Figura 2: Columna estratigráfica del Precámbrico en Tandilia (Fuente: Iñiguez Rodríguez, 1999)

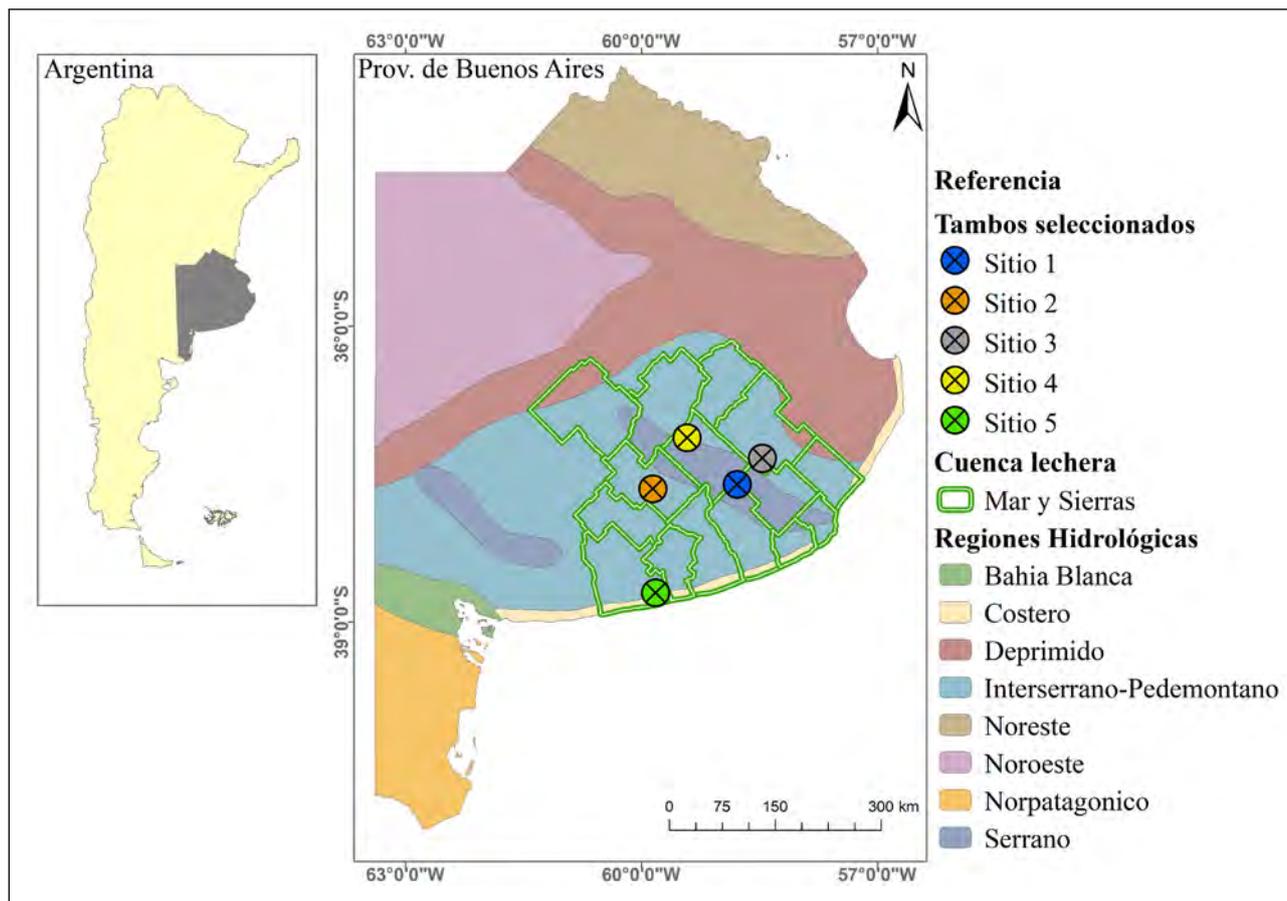


Figura 3: Tambos seleccionados ubicados según las regiones hidrogeológicas (Auge, 2004)

estudio y su medio físico natural, donde se observan las diferencias entre ellos.

La extensión de la cuenca lechera Mar y Sierras y la presencia del sistema serrano de Tandilia, proporciona una amplia variabilidad en características geomorfológicas, edáficas e hidrológicas superficiales y subterráneas. Asimismo, otorga al lugar una identidad y dinámicas socio productivas propias en relación con el nivel de turismo que presenta la zona, en el cual la gastronomía de productos regionales (derivados lácteos entre ellos) forma parte esencial.

De las visitas y entrevistas a productores tamberos, se obtuvo la caracterización de los procesos productivos para cada sitio. Los tambos en Sitios 1 y 4 fueron los de mayor tamaño. En ambos se contaba con dos salas de ordeño para manejar la cantidad total de animales. Se identificó que, aunque los tambos de cada sitio antes mencionados pertenecían a una única gerencia, presentaban diferencias en la gestión del rodeo, uso de agua y por lo tanto en el caudal y calidad del efluente final. El tambo en sitio 5 era de tamaño intermedio con 400 vacas en ordeño (VO). En los sitios 2 y 3, la producción era de escala familiar con 60 y 36 VO, respectivamente.

Tabla 1: Síntesis de aspectos clave productivos y de infraestructura

Característica	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5	
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde		
Productivas	L leche/ ordeño	4080	6360	450	750	3050	5700	4250
	V.O.	340	530	36	60	340	560	400
	Tiempo de ordeño (min)	140	220	39	37	215	228	158
Infraestructura	Pares de bajadas	24	24	24	12	12	16	18
	Caudal de agua (m <sup>3</sup> /ordeño)	25,10	25,10	12,00	4,63	30,02	36,02	16,21

Donde: Tbo1= Tambo 1, Tbo2= Tambo 2, Tbo Cco= Tambo Chico y Tbo Gde= Tambo Grande, VO= Vacas en ordeño

Tabla 2: Síntesis de aspectos clave del medio físico

Característica	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5		
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde			
Taxo ppal suelo	Argiudol típico		Argiudol petrocálcico	Argiudol vértico	Argiudol típico		Argiudol páquico		
Medio natural	Prof. NE (m)	Min	4,9	5,8	2,2	1,4	2,9	3,4	2,5
		Max	7,4	6,5	3,2	2,7	4,2	4,1	3,9
		Med	6,6	5,5	2,6	2,1	3,8	3,8	3,1

Donde: Taxo Ppal= Taxonomía principal del suelo, Prof. NE= Profundidad del nivel estático, Min= Mínimo, Max= Máximo, Med= Media

El abastecimiento de agua potable para consumo humano, animal y productivo fue de fuente subterránea. Los sitios contaban con bombas sumergibles para extraer agua del acuífero libre. En ninguno de los sitios se contaba con información antecedente sobre las características constructivas del pozo (perfil, profundidad, materiales).

En cada sitio se evidenció una variación temporal (a lo largo del año bajo estudio) en la profundidad del recurso hídrico subterráneo (Tabla 2). Factores climáticos determinaron períodos de déficit y excesos hídricos que se vieron reflejados en la medición de los niveles piezométricos. Sin embargo, todos permanecieron dentro de los rangos esperados según los balances hídricos modulares de la zona.

La Tabla 3 sintetiza la calidad fisicoquímica del agua. Al igual que con la profundidad, se observó una variación espacio temporal en las concentraciones de nitratos y cloruros. El recurso utilizado para la producción y en pozos vecinos de referencia, no mostraron grandes variaciones a excepción del Tambo 2 del Sitio 1. La laguna de tratamiento de efluente se construyó a escasos metros del pozo que abastece de agua. El cono de depresión generado por el bombeo favorece la circulación del agua subterránea y potenciales contaminantes provenientes de la infiltración de las lagunas. Si bien en este sitio los valores en el recurso hídrico subterráneo muestran un impacto de contaminación puntual, se aplicó la metodología a fin de evaluar la vulnerabilidad del medio físico y

Tabla 3: Variación de nitratos y cloruros en pozos de agua

Tambo	Marzo 2018	Septiembre 2018	Febrero 2019	Agosto 2019	
<b>Nitratos (mg/L)</b>					
Sitio 1	Tbo 3	37,1	35,4	24,0	25,8
	Tbo 2	<b>381,9</b>	<b>317,6</b>	<b>247,1</b>	<b>220,9</b>
	Ref	-	45,1	35,2	40,4
Sitio 2	Tbo	<b>64,6</b>	<b>51,2</b>	35,4	37,7
	Ref	-	46,6	35,2	38,7
Sitio 3	Tbo	23,4	29,6	18,2	18,2
	Ref	6,6	6,3	5,7	6,4
Sitio 4	Tbo C	44,0	<b>47,8</b>	40,7	44,2
	TboG	<b>46,0</b>	37,0	32,7	37,0
	Ref	-	37,82	31,93	37,25
Sitio 5	Tbo	30,8	29,0	23,2	26,0
	Ref	-	<b>63,5</b>	<b>49,8</b>	40,9
<b>Cloruros (mg/L)</b>					
Sitio 1	Tbo 3	80,0	88,5	46,0	48,0
	Tbo 2	197,9	163,5	88,0	74,0
	Ref	-	52,98	30,0	28,0
Sitio 2	Tbo	58,0	50,0	34,0	28,0
	Ref	-	48,0	22,0	20,0
Sitio 3	Tbo	76,0	76,0	50,0	58,0
	Ref	94,0	80,0	46,0	46,0
Sitio 4	TboG	46,6	46,0	36,0	26,0
	Tbo C	34,7	43,0	30,0	28,0
	Ref	-	19,5	20,0	14,0
Sitio 5	Tbo	847,7	699,8	484,8	479,9
	Ref	-	549,8	414,9	489,8

Donde: Ref = Pozo de referencia

\*Resaltados aquellos pozos con concentraciones por encima de los valores mínimos recomendados por el Código Alimentario Argentino.

la carga contaminante en dicha situación.

En el análisis, comparación y distribución de los contaminantes entre pozos debe considerarse las dinámicas del recurso subterráneo, así como los usos de suelo predominantes. El sistema de Tandilia cuenta con una amplia historia de actividad agrícola ganadera lo cual favoreció la presencia de nitratos en concentraciones elevadas, considerándolo como un ion mayoritario (Hernández, 2005).

### 3.4 Método GOD+S

#### Vulnerabilidad del acuífero

La principal fuente de agua explotada en los establecimientos proviene del acuífero libre, por su facilidad en la extracción, sus propiedades fisicoquímicas y la ausencia de otras alternativas. Por lo tanto, el coeficiente de ocurrencia es de 1,0. Asimismo, el sudeste de la provincia de Buenos Aires presenta como sustrato litológico el Loess pampeano, por lo cual su coeficiente es 0,5 para todos los tambos.

Como se mencionó, la profundidad del nivel de agua varió significativamente. De las mediciones realizadas en campo, se consideraron aquellos pozos que abastecen de agua al establecimiento, ya que en todos los casos corresponden a los puntos más cercanos a donde se realiza la disposición final de efluentes/purines. Para mantener un criterio conservador, se tomó el registro de menor profundidad de nivel de agua subterránea a boca de pozo, por lo tanto, la situación más desfavorable.

A partir de los valores de profundidad de agua subterránea (Tabla 2), se asignó a los tambos en el sitio 1 un coeficiente de 0,8. Los sitios 2, 4 y 5, cuentan con un coeficiente de 0,9. El sitio 3, por otro lado, alcanza un coeficiente de 1.

De igual manera, se asignaron los coeficientes a partir de las características del suelo, de acuerdo con lo expresado en la Tabla 2. En el sitio 2 y 4 (zonas de Benito Juárez y La Pastora) los suelos presentan texturas franco arcillosas por lo cual se le asigna un coeficiente de 0,6. En el Sitio 1, próxi-

mos a Napaleofú los suelos presentan texturas de tipo franco limosas/limosas, a lo cual se asignó un valor de 0,8. En la zona costera, la textura presenta mayor presencia de arenas en el perfil, por lo cual se asigna un coeficiente de 0,85. Por último, el sitio 3 presenta suelos de tipo argiudol vértico, es decir con alta concentración de arcillas expansivas, lo que representa mayor facilidad para procesos de infiltración y percolación. Por lo tanto, se asignó un valor de 0,95.

La Figura 4 y la Tabla 4 resumen el cálculo de los componentes para cada sitio y el índice de vulnerabilidad del acuífero, el cual varía entre 0,32 y 0,5.

#### Carga Contaminante

El ICC se obtuvo a partir de las siguientes características:

#### Clase de contaminante:

El efluente generado en la actividad de tambo se compone principalmente de altas cargas de materia orgánica producto de los desechos animales, leche de descarte, restos de productos de limpieza, alimentos balanceados y barro/ tierra. La carga de nitrógeno (N) es importante, se presenta en forma orgánica (ácidos nucleicos, proteínas) e inorgánica ( $\text{NH}_4^+$ ). No se detectó la presencia de ión nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) generada directamente por el desecho animal. Sin embargo, a partir de los procesos de nitrificación es de esperar la generación de esta especie oxidada del nitrógeno, elemento estable en agua, de insignificante transformación, que se moviliza con el flujo advectivo y que termina percolando hasta alcanzar el recurso hídrico subterráneo, generando un ciclo de aporte, extracción y vuelco de nitrato en suelo. Por tal motivo, es relevante analizar el peligro de contaminación al recurso hídrico subterráneo del nitrato.

Debido a las características del  $\text{NO}_3^-$ , su insignificante degradación en el medio y poco retardamiento en el perfil edáfico, se definió la clase contaminante para los tambos bajo estudio en 1,0.

**Tabla 4: Caracterización de la vulnerabilidad del acuífero en sitios de estudio**

Componentes	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Distancia al agua	0,80	0,8	0,9	1	0,9	0,9	0,9
Ocurrencia de agua subterránea	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Sustrato litológico	0,50	0,50	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Suelo	0,80	0,80	0,6	0,95	0,6	0,6	0,85
Vulnerabilidad del acuífero	<b>0,32</b>	<b>0,32</b>	<b>0,45</b>	<b>0,5</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>

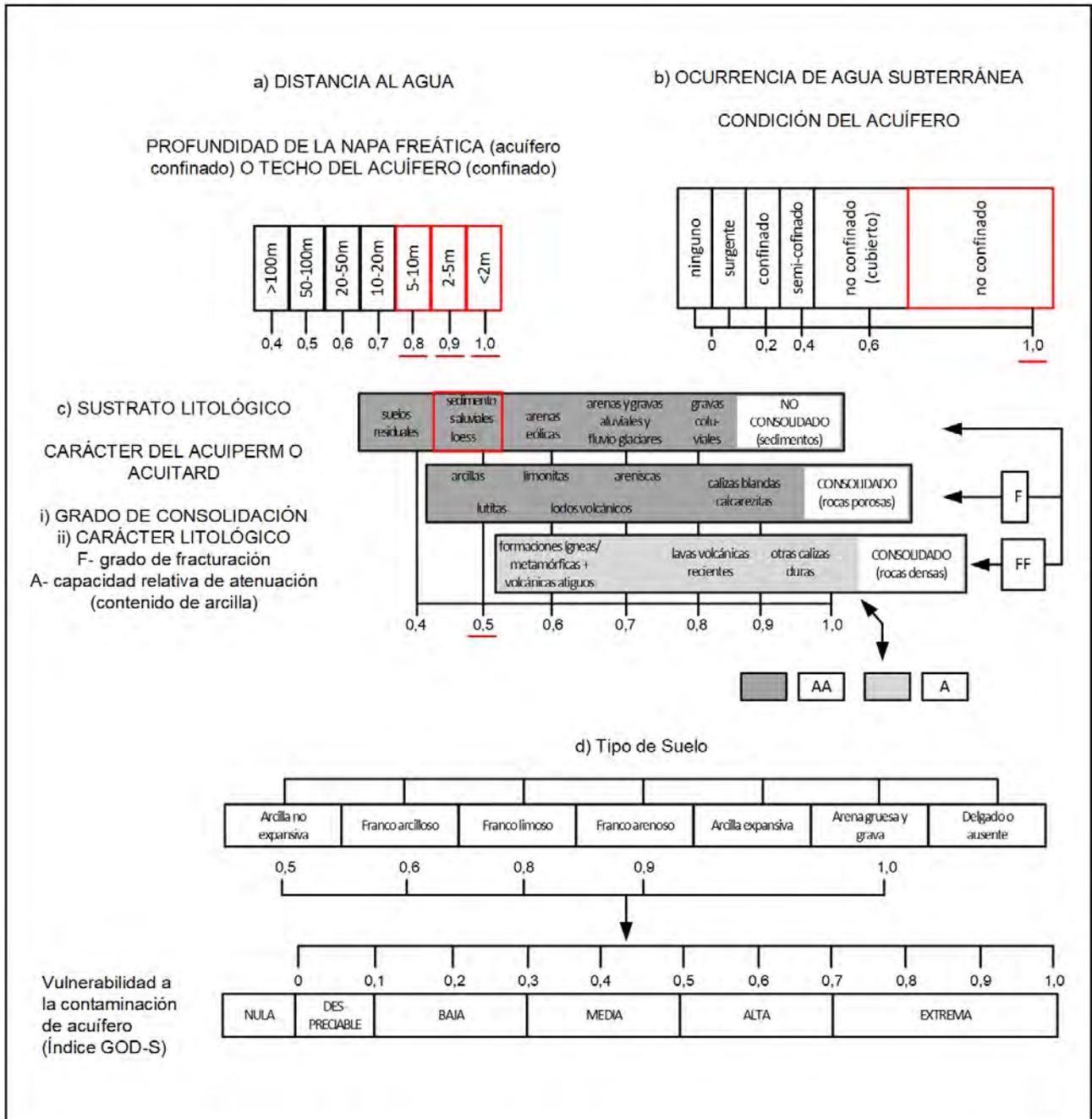


Figura 4: Vulnerabilidad del acuífero (Fuente: Adaptado a partir de Foster et al., 2002)

**Intensidad de contaminación:**

Los sitios bajo análisis no contaban con sistemas de tratamientos acorde a sus necesidades. En Napaleofú y Orense (Sitios 1 y 5), los tambos contaban con lagunas de estabilización previo al vuelco a suelo. Por problemas en su diseño y constantes rebases, la impermeabilización (con silo bolsas) debió ser retirada. En el Sitio 4 (La Pastora), se diseñó una cámara de separación de sólidos a la salida de los corrales de espera. El líquido era canalizado hasta un predio vecino sin protección. En los tambos de escala familiar de Benito Juárez y Ayacucho, no se contaba con tratamiento alguno.

De acuerdo con los valores de  $N_t$  volcados, y a los coeficientes de remoción según tipo de disposición por establecimiento, se determinó una concentración de  $NO_3^-$  con potencialidad de alcanzar el recurso subterráneo. Los valores oscilaron en un rango entre 1,52 y 0,17 órdenes de magnitud por sobre el límite recomendado por la OMS (50 mg/L).

En comparación con el área de recarga regional del sistema hídrico subterráneo, la superficie de afectación por el vuelco de los efluentes, pueden considerarse de tipo puntual ya que representa una baja proporcionalidad.

Por lo tanto, de acuerdo con la gráfica presentada en la

metodología (Figura 5.b), todos los sitios presentan un coeficiente en el rango de 0,1.

**Modo de disposición:**

En relación con la profundidad de descarga del efluente, se evidenciaron dos situaciones en relación a la gestión y disposición de los residuos. Por un lado, aquellos establecimientos donde se vuelca a predios lindantes, se los consideró como descarga superficial. Este es el caso de los tambos de escala familiar y en La Pastora (sitios 2, 3 y 4).

Por otro lado, los tambos de Orense y de Napaleofú (sitios 1 y 5) contaban con un sistema de lagunaje de estabilización, aunque sin impermeabilización, donde se consideró una descarga en profundidad. Para evaluar su peligrosidad, se efectuó un cálculo porcentual sobre la proximidad a la profundidad mínima del NE medido en el pozo más cercano.

La Tabla 5 resume los cálculos de carga hidráulica y profundidad de descarga, así como los coeficientes del modo de disposición final para cada sitio. La Figura 5.c grafica los resultados en un esquema publicado por Foster e Hirata (1988). Para facilitar su comprensión, se asignó un color a cada establecimiento.

Los tambos de escala familiar presentaron un coeficiente de 0,3 debido a su bajo caudal y su disposición superficial. Aunque con un volumen mayor de residuos, el ‘Tambo Gran-

de’ de La Pastora evidenció el mismo coeficiente debido a una mayor superficie de vuelco que disminuye el valor de carga hidráulica para el sitio.

**Duración de la carga:**

Debido a las dinámicas fisiológicas de animales y productivas de los establecimientos, se realizan dos ordeñes diarios por tambo. Aunque el volumen total y las concentraciones de contaminantes varían de acuerdo con la época del año y cantidad de animales bajo ordeño, la probabilidad de generar el efluente y volcarlo al medio es de 100 %.

Asimismo, de acuerdo a las entrevistas realizadas a productores y encargados, los establecimientos cuentan con más de 20 años de actividad de forma ininterrumpida.

En base a lo anterior, el coeficiente de duración de carga asignado es de 1,0 para todos los tambos.

**Cálculo de índice de carga contaminante:**

A partir de los coeficientes anteriormente desarrollados, se estimó el índice de carga contaminante para cada establecimiento bajo estudio. El ICC varía de 0,72 a 0,6, siendo los tambos en Napaleofú los de mayor complejidad y el tambo BJ el de menor índice (Tabla 6).

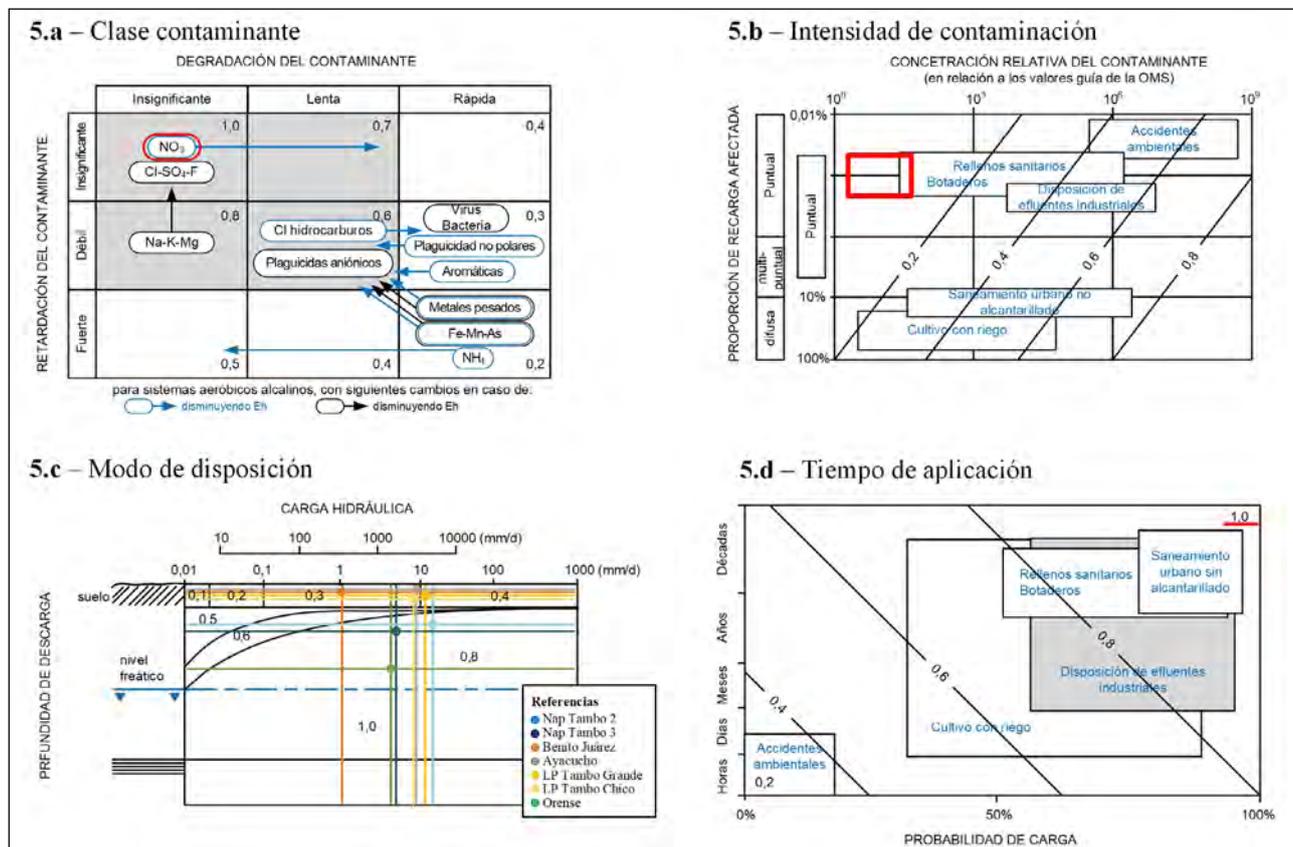


Figura 5: Cargas contaminantes (Fuente: Elaboración personal en base a Foster et al., 2002)

Tabla 5: Datos para el cálculo de coeficiente

Tambo	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Prof de NE (m)	6,64	5,46	2,20	1,40	3,35	2,86	2,50
Prof descarga (m)	2,50	2,50	Sup	Sup	Sup	Sup	2,00
Q efl (m <sup>3</sup> /día)	17,1	19,9	8,4	4,5	18,9	42,2	14,4
Sup tratamiento* (m <sup>2</sup> )	1109,7	3778,5	13596,0	532,1	1786,3	5245,2	3376,6
Inf nat PP media (mm)	165,6	165,6	151,0	165,6	151,0	151,0	138,2
Inf /día (mm)	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4
Carga hidráulica (mm/día):	15,9	5,7	1,0	8,9	11,0	8,5	4,6
<b>Coefficiente Modo de Disposición</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>	<b>0,8</b>

Donde: Prof = Profundidad; NE = Nivel estático; Q efl = Caudal de efluente; Sup tratamiento = Superficie de tratamiento (Sumatoria del área que ocupan las diversas lagunas o piletas donde se depositan los efluentes/purines en el tambo); Inf nat PP media = Infiltración natural de la precipitación media; Inf/día = Infiltración por día

### 3.5 Peligro de contaminación

Calculados los índices de vulnerabilidad del acuífero y carga contaminante del nitrato para cada sitio, se procedió a establecer su interacción a través del entrecruzamiento de dichos índices, con el objetivo de determinar el peligro de contaminación (Tabla 7). Con el fin de identificar los establecimientos dentro del esquema, se conservan los colores anteriormente detallados para cada tambo (Figura 6).

La mayoría de los sitios bajo estudio presentaron un peligro Moderado de contaminación del acuífero por nitratos, con excepción del sitio 3 (Ayacucho) y sitio 5 (Orense) que mostraron un peligro Elevado. Debido al volumen y descarga de efluentes, los establecimientos de mayor tamaño productivo presentaron un índice de carga contaminante mayor, aunque como se ubican en zonas con un acuífero menos vulnerable principalmente por la profundidad del nivel freático, el peligro disminuye.

El tambo de 'Ayacucho', aunque de escala familiar, pre-

sentó un índice de carga contaminante acorde al tamaño productivo. Sin embargo, la mayor vulnerabilidad del acuífero donde se sitúa, le otorga una peligrosidad de contaminación en la escala de elevado.

### Conclusiones

La determinación del peligro de contaminación hídrica por la disposición de efluentes generados en la actividad de ordeño bovino en tambo brinda una importante información de base para la toma de decisiones tanto en ámbito público y privado, como así también para asesores y servicios de productores tamberos.

El procedimiento metodológico desarrollado, implicó la identificación y caracterización físico-natural del medio donde se localizan los establecimientos objeto de estudio y la evaluación de la gestión del agua y la generación, tratamiento y disposición final de los efluentes de la actividad de ordeño bovino.

Tabla 6: Carga contaminante de nitratos

Componentes	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Clase de contaminante	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Intensidad de contaminación	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Modo de disposición	0,8	0,8	0,3	0,4	0,8	0,8	0,8
Duración de la carga	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ICC (NO <sub>3</sub> )	0,72	0,72	0,6	0,62	0,72	0,72	0,72

Donde: ICC= Índice de carga contaminante modificado según Lexow *et al.* (2016)

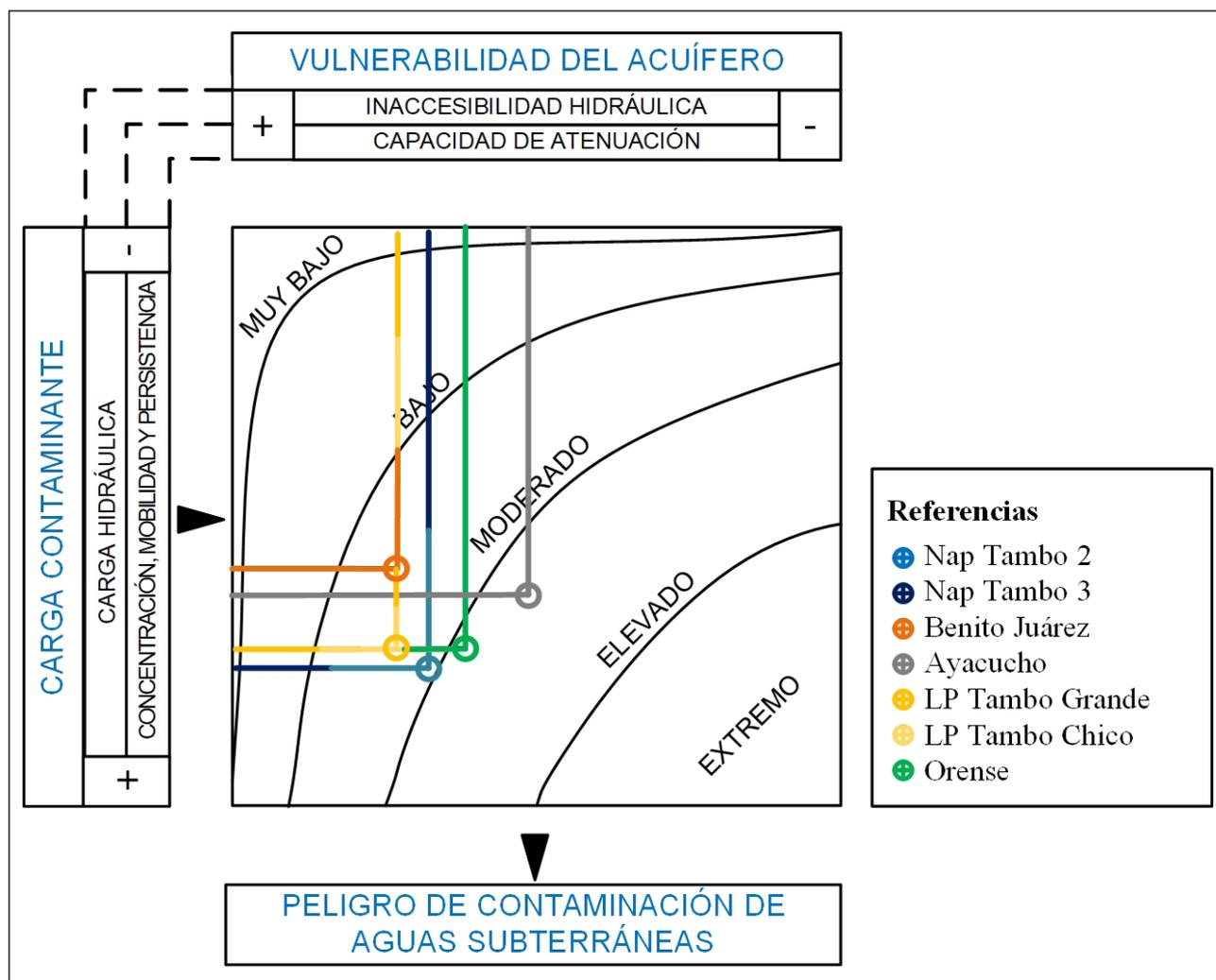


Figura 6: Peligro de contaminación

La mayoría de los sitios bajo estudio presentaron un ‘moderado’ peligro de contaminación del acuífero, a excepción de los sitios 3 y 5, ubicados en Ayacucho y Orense respectivamente, que presentan un peligro ‘elevado’ de contaminación. Aunque la actividad de ordeño bovino esté estandarizada en sus procesos generales, las particularidades de cada lugar y las características del medio físico generan dinámicas específicas que deben ser consideradas.

No se observó gran variabilidad en el ICC entre establecimientos. Los sitios con mayor valor (0,75) están asociados a un modo de disposición de efluente similar. La construcción de los sistemas de lagunaje sin impermeabilización hace que

este método sea contraproducente al concentrar gran volumen de caudal en poca superficie y a profundidad (mayor cercanía al nivel freático).

El principal componente que determinó la vulnerabilidad del acuífero fue la distancia al recurso subterráneo. Sin embargo, en todos los sitios el nivel freático se encontró somero, entre 2 y 10 metros de profundidad.

Como sucede con otras actividades primarias y agroindustriales en la región, la única fuente de agua disponible es la subterránea. La protección de los acuíferos que abastece el agua debe ser considerada en las políticas públicas y em-

Tabla 7: Peligro de contaminación

Tambo	Sitio 1		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4		Sitio 5
	Tbo 2	Tbo 3			Tbo Cco	Tbo Gde	
Vulnerabilidad del acuífero	0,4	0,4	0,45	0,5	0,45	0,45	0,45
Índice de carga contaminante (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0,72	0,72	0,6	0,62	0,72	0,72	0,72
Peligro de contaminación	Moderado	Moderado	Elevado	Moderado	Elevado		

presariales, ya que su deterioro impactará a mediano o largo plazo en la rentabilidad del producto y la salud animal y de la población local y regional. Para ello es básico y necesario conocer la vulnerabilidad del mismo y fundamentalmente trabajar en la mejora del manejo de los efluentes, y su tratamiento para disminuir el impacto de la carga orgánica, favoreciendo formas más seguras de disposición.

El método GOD, utilizado en el presente trabajo, no presenta mayor complejidad en su cálculo y requiere de información que, en general, es de fácil acceso y producción. Sin embargo, es necesario el conocimiento de funcionamiento del sistema para su correcta interpretación. Su fácil aplicación la hace una herramienta de gran utilidad para una aproximación al entendimiento de la problemática ambiental y a la gestión territorial.

### Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Nicolás Eloy Cisneros Basualdo, Víctor Alejandro Ruiz de Galarreta, Roxana Bettina, Banda Noriega, Roberto Esteban Miguel y Corina Iris Rodríguez. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Nicolás Eloy Cisneros Basualdo y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

### Declaración de conflictos de intereses

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

### Referencias bibliográficas

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R. y Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. *US Environmental Research Laboratory, Report 600/2-87/035*.
- Auge, M. (2004). *Regiones hidrológicas: provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. Edición del autor*.
- Auge, M. (2007). *Vulnerabilidad de acuíferos: conceptos y métodos*. SEGEMAR.
- Barbulescu, A. (2020). Assessing groundwater vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like methods: A review. *Water*, 12(5), 1356. <https://doi.org/10.3390/w12051356>
- Cifuentes, M. R., Rodriguez, C. I., Ruiz de Galarreta, A. y Gabellone, N. (2022). Dinámica hídrica y balance hidrológico en la cuenca del embalse Lago del Fuerte, Tandil. *Cuadernos del CURIHAM*, 28. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.178>
- Foster, S. y Hirata, R. (1988). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. CEPIS.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M. (2002). *Groundwater quality protection: A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. World Bank.
- FunPEL. (2013). *Anuario de la lechería argentina*. Inforcampo S.A.
- García, K., Arenas, M., Filipone, J. y Charlón, V. (2011). Evaluación de un tamiz estático para el tratamiento de los efluentes de tambo. En *34º Congreso Argentino de Producción Animal*. ASAS-AAPA
- Gastaldi, L., Litwin, G., Maekawa, M., Moretto, M., Marino, M., Engler, P. y Galetto, A. (2020). Encuesta sectorial lechera del INTA: resultados del ejercicio productivo 2018-2019. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Grondona, S., Gavilán, S., Massone, H. y Quiroz Londoño, O. M. (2013, 17-20 de septiembre). Evaluación de la peligrosidad de contaminación por pesticidas en la cuenca del río Quequén Grande, provincia de Buenos Aires [presentación en congreso]. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea, Universidad Nacional de La Plata, La Plata (Argentina).
- Hernández, M. (2005). Panorama ambiental de los recursos hídricos subterráneos en la provincia de Buenos Aires. En *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* (pp. 347-358). Ministerio de Producción de la Provincia de Buenos Aires.
- Iñiguez Rodríguez, A. (1999). La cobertura sedimentaria de Tandilia. En R. Caminos, *Anales de la Geología Argentina* (Vol. 29) (pp. 101-106). SEGEMAR.
- La Manna, A. y Malcuori, E. (2012). El uso de herramientas económico-ambientales para el diseño de políticas públicas: aplicación de una matriz de riesgo para priorizar casos en lechería. *Revista INIA*, 31, 54-60.

- Lexow, C., Di Martino, C., Lafont, D., Albouy, R. y Marcos, A. (2016). Identificación y cuantificación de la carga contaminante al acuífero de la localidad de Monte Hermoso. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 37, 37-44.
- Mancuso, W. y Teran, J. (2008). El sector lácteo argentino. En *INTA, XXI Curso Internacional de lechería para profesionales de América Latina* (pp. 13-22). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Mienis, O. y Arye, G. (2018). Long term nitrogen behavior under treated wastewater infiltration basins in a soil-aquifer treatment (SAT) system. *Water Research*, 134, 192-199.
- Miguel, R. E. (2009). *Gestión de residuos de arenas de fundición en Tandil y su impacto en el sistema hídrico subterráneo*. Tesis de Maestría. Facultad regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional).
- Organización Mundial de la Salud ([OMS], 2006). *Guías para la calidad de agua potable* (3ª ed., Vol. I).
- Ruffo, A. G., Lafont, D., Carbajo, M., Albouy, R. y Lexow, C. (2019). Peligro de contaminación del acuífero freático en la localidad balnearia de Monte Hermoso, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 42, 15-22.
- Ruiz de Galarreta, A., Banda Noriega, R. y Granato, M. F. (2004). Riesgo de contaminación del agua subterránea debido a las actividades en el parque industrial de Tandil [presentación en evento]. IV Seminario-Taller. "Protección de Acuíferos Frente a la Contaminación: Protección de la Calidad del Agua". Red XVII-A (CYTED), Lima (Perú).
- Suzuki, T., Katsuno, T. y Yamaura, G. (1992). Land application of wastewater using three types of trenches ser in lysimeter and its mass balance of nitrogen. *Water Research*, 26, 1433-1444.
- Taverna, M., García, K. y Adorni, M. (2014). *Procedimiento de muestreo de efluentes líquidos y residuos sólidos orgánicos generados en tambo*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Teruggi, M. (1974). Los dominios tectónicos de la región de Balcarce. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 29(3), 265-276.
- Teruggi, M. y Kilmurray, J. (1975). Tandilia. En *Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires. 6to Congreso Geológico Argentino* (pp. 55-77).
- Teruggi, M. y Kilmurray, J. (1980). Sierras Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires. En J.Turner (Ed.), *Segundo Simposio de Geología Regional Argentina* (pp. 919-956). Academia Nacional de Ciencias de Córdoba.
- Valles, M. S. (1999). *Técnicas cualitativas de investigación social: reflexión metodológica y práctica profesional*. Editorial Síntesis S.A.
- Wang, X., Tieheng, S., Li, H. y Pand, J. (2010). Nitrogen removal enhanced by shunt distributing wastewater in a subsurface wastewater infiltration system. *Ecological Engineering*, 36, 1433-1438.
- Zaporozec, A., Conrad, J., Hirata, R., Johansson, P., Nonner, J., Romijn, E. y Weaver, J. (2002). *Groundwater contamination inventory: A methodological guide*. IHP-VI, UNESCO.

# Evaluación de los productos de evapotranspiración disponibles en Climate Engine y del algoritmo Support Vector Machine Regression con datos NASA Power

## Evaluation of evapotranspiration products available from Climate Engine and the Support Vector Machine Regression model with NASA Power data.

 María Florencia Degano<sup>1,2\*</sup>   Raúl Eduardo Rivas<sup>2,3</sup> 

\* Contacto

Recibido: 27 de febrero de 2023 • Aceptado: 24 de abril de 2023 • Publicado: 28 de julio de 2023

### Resumen

El manejo hidrológico de un país depende, en gran medida, del conocimiento de las cuencas existentes, del potencial de estas y de la manera de gestionar adecuadamente los excedentes hídricos. En este sentido es de vital importancia el estudio y análisis de la evapotranspiración (ET) de referencia ( $ET_0$ ), real y potencial (ETp). Por lo que se torna indispensable evaluar el comportamiento de los diferentes productos de ET que se encuentran disponibles para su uso de manera libre. En este sentido, el objetivo principal de este trabajo es analizar los datos de los modelos existentes en la plataforma *Climate Engine* (*TerraClimate*, ERA 5, MERRA-2 y MOD16A2), que posee datos a diferentes escalas temporales y espaciales. Además, evaluar el algoritmo *Support Vector Machine Regression* (SVR) de inteligencia artificial, aplicado con parámetros obtenidos de NASA Power y con datos locales registrados en la Región Pampeana Argentina (RPA). En general, el error cuadrático medio (RMSE) varía entre 0,5 y 1,2 mm d<sup>-1</sup> y los valores del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) entre 0,6 y 0,9 (para  $ET_0$ ); entre 0,4 y 0,7 para ET real y entre 0,6 y 0,9 para ETp. Asimismo, queda demostrado que el modelo más propicio para el cálculo de  $ET_0$  como ET real, es el SVR, mientras que para ETp es ERA 5.

**Palabras clave:** inteligencia artificial, productos de reanálisis, productos de satélite.

1. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
2. Instituto de Hidrología de Llanuras, Tandil, Buenos Aires, Argentina
3. Comisión de Investigaciones Científicas

## Abstract

The hydrological country management depends on the knowledge of the existing basins, their potential and to adequately manage water surpluses. In this sense, the study and analysis of reference ( $ET_0$ ), actual and potential ( $ET_p$ ) evapotranspiration (ET) is of vital importance. Therefore, it is essential to evaluate the behavior of the different ET products that are freely available for use. Therefore, the main work objective is to analyze the data of the existing models in the *Climate Engine* platform (*TerraClimate*, ERA 5, MERRA-2 and MOD16A2), which has data at different temporal and spatial scales. In addition, to evaluate the artificial intelligence Support Vector Machine Regression (SVR) algorithm, determined with parameters obtained from NASA Power, with local data in the Argentinean Pampean Region (APR). In general, the Root Mean Square Error (RMSE) varies between 0.5 and 1.2 mm d<sup>-1</sup> and Nash-Sutcliffe Efficiency Index (NSE) values between 0.6 and 0.9 ( $ET_0$ ); between 0.4 and 0.7 for actual ET and between 0.6 and 0.9 for  $ET_p$  were obtained. Likewise, it is demonstrated that the most favorable model for the calculation of  $ET_0$  as real ET is SVR, while for  $ET_p$  it is ERA 5.

**Keywords:** artificial intelligence, reanalysis products, satellite products.

## Introducción

El manejo hidrológico de un país depende, en gran medida, del conocimiento de las cuencas existentes, del potencial de éstas y de la manera de gestionar adecuadamente los excedentes hídricos. A partir su estudio es posible desarrollar un manejo adecuado del agua disponible, siendo necesario registrar la información no solo de las estaciones meteorológicas, sino también, validar los datos obtenidos de sensores remotos con datos *in situ* a modo de lograr medidas consistentes a fin de monitorear y/o evaluar las variables hidrológicas.

Siguiendo este eje, es posible analizar adecuadamente la Evapotranspiración (ET) para gestionar y planificar el manejo hídrico de las cuencas de llanura (Faramiñán, *et al.*, 2021a), en particular, en la Región Pampeana Argentina (RPA), dado que, alrededor del 85% del agua que precipita es devuelta a la atmósfera mediante este proceso (Weinzettel y Usunoff, 2001).

La ET es considerada un término de relevancia para el análisis de disponibilidad hídrica en diferentes tipos de suelo y clima de la RPA, en este sentido, el uso de las tecnologías y la información proveniente de satélite, reanálisis y algoritmos de inteligencia artificial es de vital importancia para el análisis hídrico de la región, en particular, en las zonas donde son escasos los datos de estaciones locales o de campo.

Actualmente, existen diversas plataformas que proveen datos de ET, calculada con información proveniente de distintos satélites y fuentes de reanálisis, como es el caso de *Climate Engine* (<http://ClimateEngine.org>). *Climate Engine* es una aplicación web de acceso libre, que opera en la nube, empleando *Google Earth Engine*, para procesar, visualizar, descargar y compartir conjuntos de datos climáticos y de teledetección en tiempo real. Posee una recopilación de productos climáticos, meteorológicos y de teledetección de diferentes variables hidrológicas, poniéndolos al servicio de la comunidad para estudios aplicados a la agricultura, finanzas y economía, cadena de producción y consumo, servicios profesionales, infraestructura y transporte, monitoreo agrí-

cola, estrés de cultivos y sequías, calor y viento extremo, peligro de inundación, capa de nieve, potencia solar, pronósticos subestacionales a estacionales, incendios, superficie del agua, en tiempo (casi) real (Huntington *et al.*, 2017).

La capacidad de esta aplicación de acceder a archivos de datos bajo demanda genera grandes oportunidades para la supervisión avanzada de los recursos naturales y la comprensión de los procesos; tal es el caso de la ET real, ET de referencia ( $ET_0$ -pasto corto); ETr-alfalfa (que no se tuvo en cuenta en este análisis) así como de la ET potencial ( $ET_p$ ) para distintas zonas del planeta, obtenida con diferentes algoritmos para su cálculo (Huntington *et al.*, 2017).

Por otro lado, el uso de las nuevas tecnologías en el estudio, determinación y aplicación de variables hidrológicas, han tomado gran importancia en el último tiempo, como es el caso de los algoritmos de inteligencia artificial, en particular *Support Vector Machine Regression* (SVR), que ha demostrado ser adecuado para el uso y análisis de la ET en zonas donde no existen o hay escasez de datos de terreno, tomando como entrada información de la base de datos de NASA Power (Faramiñán *et al.*, 2021b).

El algoritmo SVR permite obtener resultados aplicados a grandes conjuntos de datos complejos con ruido, es decir con variables inherentes al modelo que para otros algoritmos aumentan la posibilidad de error en los resultados (Chia *et al.*, 2020a; Cristianini y Shawe-Taylor, 2000; Liakos, *et al.*, 2018; Shrestha y Shukla, 2015). Debido a que la ET depende de un gran número de variables hidrometeorológicas, se lo define como un proceso complejo y no lineal, por lo que, en los últimos años se ha incrementado el uso de este algoritmo para estimarla (Chia *et al.*, 2020b; Fan *et al.*, 2018; Juarez *et al.*, 2018)

En este contexto, la ET puede analizarse a través de diferentes estimaciones de productos (obtenidos con medidas indirectas) que responden a un tipo de dato determinado. Por lo que, el objetivo principal de este trabajo es analizar los productos existentes de  $ET_0$ , ET real y  $ET_p$  en la plataforma *Climate Engine* a diferentes resoluciones espaciotempo-

rales y evaluar el algoritmo SVR (con parámetros obtenidos de NASA Power). Los resultados son comparados con datos de campo provenientes de la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) con la finalidad de conocer la mejor herramienta de monitoreo y gestión de las cuencas hidrológicas de la RPA.

### Zona de estudio y metodología

#### - Estaciones hidrometeorológicas en la región Pampeana Argentina.

Para analizar el proceso de ET mediante medidas indirectas, es necesario contar con datos de campo. En este análisis, se tienen en cuenta siete estaciones distribuidas en la RPA por presentar características edafoclimáticas representativas del proceso analizado para un área aproximada

de 520.000 km<sup>2</sup> (Degano *et al.*, 2021b) (Figura 1). La RPA se encuentra en el centro-este de la República Argentina y constituye el más importante ecosistema de praderas del país. Según Pereyra (2003), la RPA se subdivide en 12 ecorregiones: Planicies poligenéticas de Entre Ríos (D25), Pampa pedemontana cordobesa (D26), Pampa arenosa (D27), Pampa endorreica (D28), Delta del Paraná (D29), Pampa Ondulada (D30), Pampa Deprimida (D31), Planicies litorales pampeanas (D32), Sierras Septentrionales Bonaerenses (D33), Pampa Interserrana (D34), Sierras Australes Bonaerenses (D35) y Planicies poligenéticas de La Pampa (D36).

El clima de la región es subhúmedo/húmedo (centro-este) a semiárido (hacia el oeste). Las precipitaciones anuales varían entre 1200 mm en el Noreste y 600 mm en el Suroeste. En lo que respecta a la ETp, se encuentra en un rango entre 900 y 1100 mm anuales. Por su parte, la tempe-

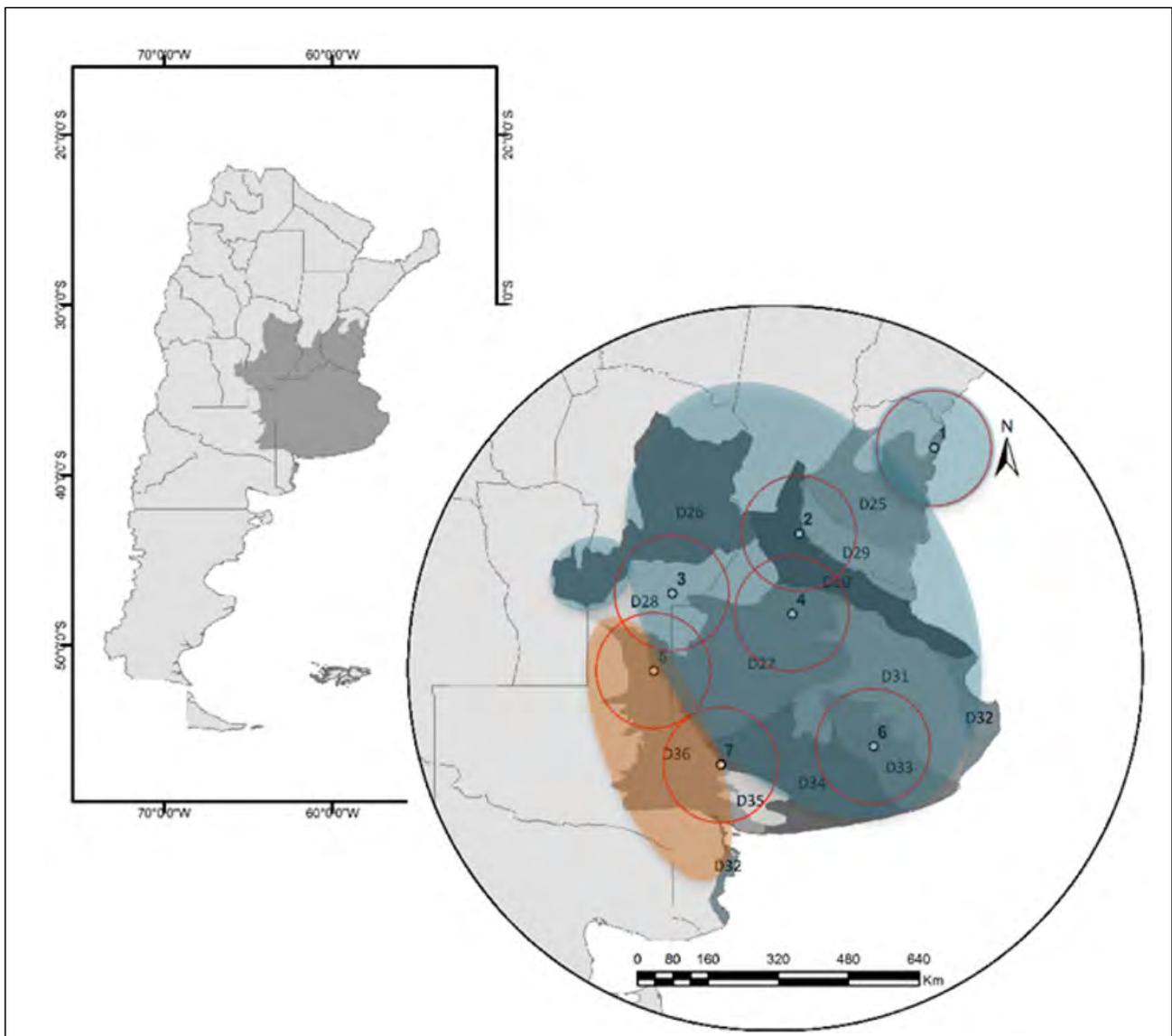


Figura 1: Ubicación de la RPA en la República Argentina; Ecorregiones (D25-D36); Distribución espacial del área de influencia de las estaciones meteorológicas (círculo rojo); Zona sombreada naranja: Región semiárida; Zona sombreada celeste: Región subhúmeda/húmeda. Estaciones: 1. Concordia; 2. Rosario; 3. Laboulaye; 4. Junín; 5. General Pico; 6. Tandil; 7. Pigüé (Modificado de Degano *et al.*, 2021a)

ratura media anual máxima es de 16°C (en el Sur) y de 18°C (en el Norte); la mínima media anual se encuentra entre los 6°C y 14°C. Las temperaturas decrecen en sentido Norte-Sur, con una amplitud de 15°C en el Oeste y 12°C en el Este.

Los datos de campo utilizados fueron proporcionados por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA), que obtienen los valores de ETO con datos de entrada diarios medidos in situ por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina (precipitación, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad de viento, heliofanía o nubosidad) y se basan en el método de la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO)- Penman-Monteith (PM) (Allen *et al.*, 1998, Monteith y Unsworth, 1990). De esta se deriva la ETp, que se toma como sinónimo de ET<sub>0</sub>, debido a que el análisis se realiza en estaciones que están ubicadas en sectores con pasto corto y características de referencia.

Respecto de los datos de ET real, se obtienen despejando este término de la ecuación de balance hidrológico, de resolución temporal diaria, donde se toman los ingresos y egresos de agua del sistema (Allen, *et al.*, 1998; Basualdo, 2011):

**- Productos de reanálisis y satélite (Climate Engine)**

En este trabajo se analizaron los productos TerraClimate (Abatzoglou *et al.*, 2018), ERA 5 (Copernicus Climate Change Service, 2017), MERRA 2 (Gelaro *et al.*, 2017) y MOD16A2 (Mu *et al.*, 2013; Running *et al.*, 2017) (Tabla 1). Los productos mencionados ponen a disposición estimaciones de distintos tipos de ET: ET<sub>0</sub>, ET real y ETp calculada con el método de Hargreaves (ETp<sub>Hargreaves</sub>). Las estimaciones de la ETO derivan del modelo Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), asumiendo una superficie de pasto corto (12 cm). La determinación de la ET real es en base a la ETO. Por último, la ETp<sub>Hargreaves</sub> (Hargreaves y Samani, 1985), que requiere datos de temperatura y de radiación solar incidente (Rs) y se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre.

El producto *TerraClimate* es un conjunto de datos de reanálisis, analizando el clima a una resolución temporal mensual, mediante la ecuación de balance hídrico a nivel global. Combina datos climatológicos de alta resolución espacial del conjunto WorldClim (<https://www.worldclim.org/>), con una resolución espacial menor, con datos de CRU

Ts4.0 (*Climatic Research Unit - https://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru\_ts/*) variables en el tiempo; e información de reanálisis JRA55 (*Japanese 55-year Reanalysis - https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index\_en.html*). La ET se calcula a partir de un balance hídrico unidimensional simplificado basado en un enfoque Thornthwaite-Mather modificado, que utiliza precipitaciones, ETp (Penman-Monteith), la humedad del suelo y el almacenamiento de agua del manto de nieve.

En general, además de los productos de ET, se encuentran datos mensuales de temperatura, precipitación, velocidad del viento, presión de vapor, radiación solar, humedad de suelo, escorrentía, índices de sequía y nieve. Estos datos proporcionan información importante para los estudios ecológicos e hidrológicos a escala mundial que requieren alta resolución espacial y datos sobre el clima y el balance hídrico variables en el tiempo (Abatzoglou *et al.*, 2018).

Por su parte, ERA 5 proviene del *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), combina datos del modelo con observaciones de 24 km de resolución espacial en todo el mundo, en un conjunto de datos completo y consistente. ERA5 reemplaza a su predecesor, denominado ERA-Interim (Castañeda Calatayud, 2020). Este producto, proporciona valores agregados para cada día para distintos parámetros de reanálisis climático: temperatura, precipitación, ET, viento, condiciones atmosféricas e índices de sequía. Los datos se encuentran disponibles desde 1979 a la actualidad.

Por otro lado, el producto de reanálisis, MERRA 2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2*), reemplaza el conjunto de datos MERRA original. Es producido por la *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO) de la NASA. En particular, dentro de la aplicación *Climate Engine*, presenta productos relacionados a temperatura máxima y mínima, precipitaciones, ET, índices de sequía y fuego, con una resolución espacial de 50 km y temporal diaria.

En relación con el producto de satélite, MOD16A2 es producido con una resolución temporal de 8 días y con píxeles de 500 m. Se basa en la lógica de la ecuación de Penman-Monteith, que incluye datos de entrada de reanálisis meteorológico diario junto con productos de datos de detec-

**Tabla 1: Características de los productos de ET utilizados. \*Basado en el trabajo Degano *et al.* (2021b). \*\*El producto MOD16A2 presenta datos de ETp que, en este caso, se toma como sinónimo de ET<sub>0</sub>.**

Producto	Resolución espacial [km]	Resolución temporal	Período analizado	Dato	Base de datos
TerraClimate	4	Mensual	2009 - 2013	ET <sub>0</sub> ET real ETp <sub>Hargreaves</sub>	Reanálisis
ERA 5	24	Diario	2009 - 2013	ETp <sub>Hargreaves</sub>	Reanálisis
MERRA-2	50	Diario	2009 - 2013	ET <sub>0</sub> ETp <sub>Hargreaves</sub>	Reanálisis
MOD16A2*	0,5	8 días	2012 - 2014	ETp** ET real	Satélite

ción remota MODIS (propiedades de la vegetación, albedo, cobertura terrestre, entre otras). Los valores de píxel para las dos capas de evapotranspiración (ET real y ETp) y para el flujo de calor latente ( $LE$  y  $LE_p$ ) son la suma y el promedio de ocho días (Mu *et al.*, 2013; Running *et al.*, 2017).

#### - Obtención de los datos de la aplicación Climate Engine

A partir de los datos disponibles en la plataforma *Climate Engine* (<https://app.climateengine.com/climateEngine>), se obtienen los valores de las diferentes variables, según se encuentren disponibles en cada producto, y, se analizan, siguiendo los aportes realizados por Degano *et al.* (2021a) y Faramiñán *et al.* (2021b), los cuales brindan información necesaria para la valoración de modelos satelitales aplicados a zonas de llanura.

En este punto se determina de manera rápida y sencilla el proceso para la obtención de los datos en diferentes puntos del territorio utilizando *Climate Engine*. En la solapa "Make Graph" se determina la región de la cual se van a obtener los valores de ET, seleccionando un máximo de 5 puntos para representar geográficamente en el mapa a través de las coordenadas (latitud-longitud).

En el apartado "Variable" se determina el producto que se requiere y la variable, así como el período de tiempo del que se requieren los datos. Se genera la serie de datos ("get time series") y posteriormente se descarga la tabla con la información requerida, lo que facilita la manipulación y procesamiento de los datos.

#### - Algoritmo Support Vector Machine Regression y datos de entrada NASA Power

SVR es un modelo de regresión lineal mediante el cual, se puede definir el valor del error que se acepta en el modelo y encontrar una línea apropiada (hiperplano) para hacer el ajuste de los datos (Chia *et al.*, 2020b). Su función es minimizar los coeficientes y determinar un error absoluto menor o igual que un margen específico (error máximo), que se puede ajustar para obtener la precisión deseada.

Puede suceder que no todas las observaciones se encuentren dentro del margen de error, debido a la no linealidad de las variables explicativas (en particular, en el proceso de ET), por lo que, se debe ajustar o corregir para cualquier valor que esté fuera del error máximo y agregar las desviaciones a la función objetivo (Faramiñán, 2022).

Para el desarrollo de este algoritmo, como entrada, se tomaron variables provenientes de la base de datos NASA Power (POWER Release-8 <https://power.larc.nasa.gov/>). Estas se basan en el modelo de asimilación de *Goddard Global Modeling and Assimilation Office* (CMMS) y provienen de MERRA2, de SRB (*Surface Radiation Budget*) y de FLASH Flux. Poseen una resolución espacial de 50 km y temporal diaria.

El algoritmo SVR, se llevó a cabo según la metodología

descrita en Faramiñán *et al.* (2021a). Toma como entrada las variables principales que determinan el proceso de ET (Temperatura, Humedad Relativa, Presión Superficial, Radiación de onda corta y larga entrante y Velocidad de Viento), entre el año 1984 y 2021 (denominadas variables explicativas) para relacionarlas con datos de ET real y ETp medidas *in situ* (de la ORA) en la RPA (variables respuesta). Para desarrollar el procedimiento, se tuvieron en cuenta las librerías de Python: Pandas, scikit-learn y NumPy y, en este caso, se utilizó el 80% de los datos para el entrenamiento del algoritmo y el 20% para hacer el testeado de los datos.

#### - Análisis estadístico

Para evaluar los conjuntos de datos tanto de los productos de ET de reanálisis, como de satélite e inteligencia artificial, se utilizaron métricas estadísticas relacionadas al tipo de estudio. Por lo que, se evaluaron la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la pendiente (a) y la ordenada del origen (b), la Mediana (Me) y la desviación estándar robusta (RSD)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{|\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)|}{N} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2)^{0,5}} \right)^2 \quad (4)$$

$$RSD = 1,483 Me (|(E_i - O_i) - Me(E_i - O_i)|) \quad (5)$$

donde  $E_i$  son los valores estimados,  $O_i$ , los valores observados y  $N$  es el número de observaciones. Respecto del NSE, se trata de un indicador que se utiliza a menudo en hidrología, debido a que es muy flexible para ser aplicado a distintos tipos de modelos matemáticos, aunque se deben tener en cuenta sus limitaciones, como lo es la sensibilidad al sesgo en las predicciones del modelo y el posible efecto de los valores atípicos de la serie de datos. Este índice determina que el modelo es "insatisfactorio", cuando el valor de NSE es menor a 0,65; "aceptable", cuando el NSE es  $\geq 0,65$ ; "bueno" cuando se trata de un valor  $\geq 0,8$  y "muy bueno" cuando el valor es  $\geq 0,9$  (McCuen *et al.*, 2006; Ritter y Muñoz, 2013).

## Resultados y discusión

### - Evapotranspiración de referencia - $ET_0$

Esta variable se encuentra disponible en el producto de *TerraClimate* (los datos de este producto se pasaron a valores diarios  $ET/n$ , siendo  $n$  la cantidad de días del mes) MERRA-2, MOD16A2 (los valores de  $ET$  se llevaron a una resolución diaria, aplicando  $ET/8d$ ) y se pretende modelar con el algoritmo SVR. En la Tabla 2 se muestran los estadísticos obtenidos para los diferentes productos de  $ET_0$ . Cabe aclarar que este análisis se realizó sobre todas las estaciones determinadas en la Figura 1, ubicadas en la RPA, por lo que, en este apartado se estudia la región en general.

Según el análisis de las métricas estadísticas, que muestran para los productos de reanálisis un error menor en lo que respecta al producto *TerraClimate* en comparación con MERRA-2, en ambos casos la distribución de los datos es consistente, determinada por el valor de  $R^2$ , cuyo valor es cercano a 1 en ambos casos. Por su parte, la Mediana, que determina el error sistemático, arroja valores positivos para ambos productos, lo que indica una sobreestimación. El NSE indica que ambos modelos son “muy buenos” para la determinación de la  $ET_0$ .

Respecto del producto de satélite, MOD16A2, se tomaron los valores obtenidos por Degano *et al.* (2021b). Los errores obtenidos son mayores que para el resto de los productos en general. Asimismo, la distribución de los datos es muy buena, determinada por el  $R^2$ . En general, el producto sobreestima sistemáticamente, determinado por la Mediana positiva. Respecto del NSE, el producto es “aceptable” y con utilidad para conocer la variabilidad espacial y temporal. En este caso, Degano *et al.* (2021ayb) desarrollaron un ajuste lineal para corregir este producto. Tras la corrección, los errores disminuyen significativamente, y los resultados del producto mejoran considerablemente. El RMSE y el MAE se reducen en torno al 85%, y el NSE asciende a 0,9, otorgando al modelo una calificación de “muy bueno” para obtener los valores de la  $ET_0$ .

Por último, el producto obtenido mediante el algoritmo de inteligencia artificial muestra errores menores que en el resto de los productos, con valores de NSE que indican que el modelo es “bueno” para su aplicación en el campo de la  $ET_0$ .

En particular, se analizaron dos estaciones de la RPA para los productos *TerraClimate* y MERRA-2 (Figura 2), la estación General Pico, que se encuentra en la zona semiárida, y

la estación Tandil, ubicada en la región subhúmeda-húmeda. Para el producto *TerraClimate*, el RMSE para General Pico es de  $0,8 \text{ mm d}^{-1}$ , mientras que, para la región de Tandil, disminuye a  $0,51 \text{ mm d}^{-1}$ . En ambos casos, el producto muestra una distribución cercana a la línea 1:1 hacia los valores bajos de  $ET_0$ , sobreestimando a medida que aumenta su valor. Esto indica, que, tanto en zonas húmedas como semiáridas, el producto es aplicable, ya que, los errores asociados se encuentran dentro de lo esperable para productos de reanálisis (Allen *et al.*, 2011).

Por otro lado, se observan diferencias en las comparaciones del producto MERRA-2 con datos de campo, respecto de cada zona. Por un lado, en la zona semiárida, la distribución de la nube de puntos se encuentra más cercana a la línea 1:1 y el RMSE alcanza un valor de  $1 \text{ mm d}^{-1}$ , mientras que, en la zona subhúmeda, el comportamiento es similar al producto *TerraClimate*, mostrando una distribución cercana a la línea 1:1 en valores bajos de  $ET_0$ , y alejándose al aumentar su valor. En esta zona, el error asciende a  $1,3 \text{ mm d}^{-1}$ .

### - Evapotranspiración real – $ET_{real}$

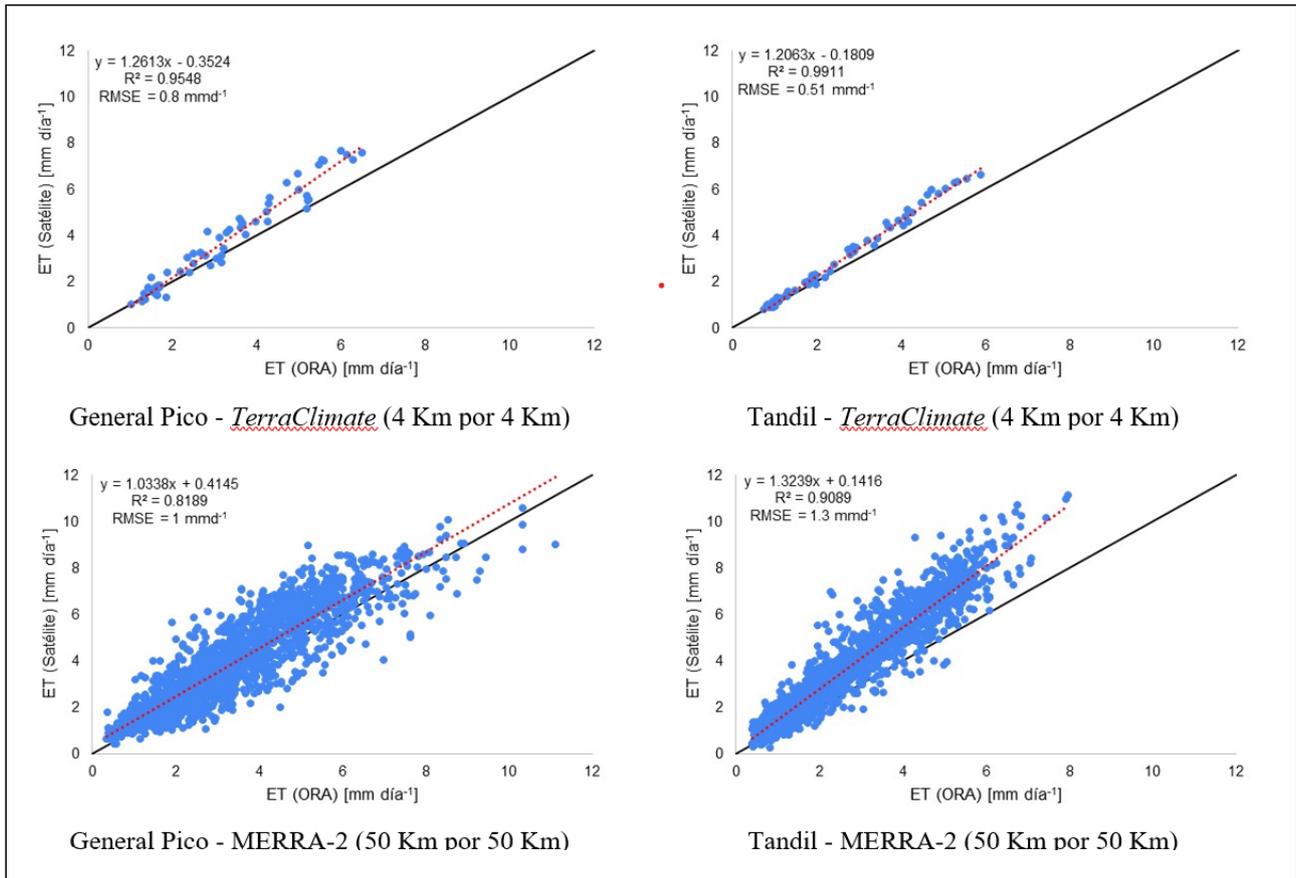
Este parámetro se encuentra disponible en el producto de *TerraClimate*, MOD16A2 y el calculado usando el algoritmo SVR. En general, según los estadísticos obtenidos para  $ET_{real}$  (Tabla 3), el modelo que mejor se ajusta es el obtenido con el algoritmo SVR, indicado por el valor mayor de NSE (que indica que el producto es “aceptable”), mientras que, *TerraClimate* indica valor negativo de NSE, mostrando una performance deficitaria para determinar la  $ET_{real}$ . Por su parte, MOD16A2 tendría la clasificación de “insuficiente”, debido a un NSE de 0,4, aunque el error obtenido se encuentra dentro de lo esperable para los productos de satélite (menor al 20% respecto del valor medio observado - Allen *et al.*, 2011; Degano *et al.*, 2021b). Asimismo, el error determinado es menor para el producto derivado de inteligencia artificial, indicando a éste como el más propicio para analizar la  $ET_{real}$ . Por el contrario, el algoritmo SVR ajustado es propio de la zona y no sería extrapolable a otras regiones del planeta.

### - Evapotranspiración potencial mediante Hargreaves – $ET_{pHargreaves}$

La evapotranspiración de Hargreaves se encuentra disponible en el producto de *TerraClimate*, ERA 5 y MERRA-2. Según los estadísticos obtenidos (Tabla 4), los modelos son “muy buenos” para analizar la  $ET_p$ , ya que el NSE otorga valores mayores a 0,9. Los resultados de los estadísticos indican

Tabla 2: Estadísticos asociados a los productos de  $ET_0$ .

Producto	Número de datos	RMSE [mm d <sup>-1</sup> ]	MAE [mm d <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>	Me [mm d <sup>-1</sup> ]	RSD [mm d <sup>-1</sup> ]	NSE
TerraClimate	399	0.5	0	0.97	0.4	0.2	0.89
MERRA-2	12329	1.1	0.1	0.81	0.4	0.8	0.88
MOD16A2	1722	3.2	3	0.85	0.7	0.9	0.57
SVR	97161	0.4	0.3	0.87	0.02	0.5	0.86



**Figura 2: Relación entre los productos TerraClimate y MERRA-2 en las estaciones General Pico (semiárida) y Tandil (subhúmeda). Línea negra: relación 1:1. Línea punteada roja: línea de tendencia**

que se encuentran dentro de los márgenes de error establecidos por Allen *et al.*, (2011) para productos derivados de información satelital. ERA5 y MERRA-2 presentan una sobreestimación observable por la mediana positiva.

Analizando los productos que se encuentran en la plataforma *Climate Engine* para la determinación del parámetro ET<sub>p</sub>, se observa que, en General Pico, el producto *TerraClimate* subestima los valores de ET<sub>p</sub>, encontrándose la nube de puntos por debajo de la relación 1:1 y el valor de mediana negativo. Por su parte, el RMSE alcanza un valor de 1,1 mm d<sup>-1</sup> para el área en donde se ubica la estación de referencia. Respecto de la región subhúmeda/húmeda, el producto se acerca a la línea 1:1 cuando la ET<sub>p</sub> presenta valores bajos, distanciándose levemente al incrementar su valor, mostrando una sobreestimación del producto y valores positivos de mediana. En esta zona los errores disminuyen (0,5 mm d<sup>-1</sup>) (Figura 3).

Respecto del producto ERA 5, los estadísticos indican errores cercanos a 1 mm d<sup>-1</sup> en ambos sitios de estudio, asimismo, la mediana es determinada por valores positivos, indicando una leve sobreestimación de los datos. En cuanto a MERRA-2, en ambas zonas, se determina un error de 1,2 mm d<sup>-1</sup>, mientras que la mediana arroja valores positivos y muy similares, determinando la sobreestimación por parte del modelo (Figura 3).

En general, Ruhoff *et al.* (2022) evaluaron distintos productos de satélite y reanálisis de ET en América del Sur, analizando los ingresos y egresos de agua del sistema. En ese sentido, encontraron que, el producto *TerraClimate* muestra resultados equilibrados en las cuencas del Amazonas, así como en otras cuencas tropicales, mientras que, en Tocantins (Brasil), se observan excesos de agua. Por su parte, el producto MOD16A2 presenta valores de desequilibrio más elevados. Así como en la cuenca del Paraná y San Francisco (Brasil), *TerraClimate* mostró un desequilibrio menor al presentado por MOD16A2. Por su parte, en la zona de Uruguay y el Atlántico Sur, tanto el producto ERA5 como MOD16A2 mostraron déficit de agua disponible. En un estudio a escala global, Lv *et al.* (2020) evaluaron los datos de MERRA-2 a nivel global, llegando a la conclusión de que esta base de datos es comparable con otras para el análisis y estudio de la ET en sus distintos productos.

Por otro lado, respecto del algoritmo SVR y los datos de entrada que se utilizaron, diversos autores analizaron las variables disponibles en la base de datos NASA Power, así como los resultados obtenidos con SVR. Como se indica en Degano *et al.* (2023), Orte *et al.* (2021) analizaron datos de entrada de Rs (NASA Power) con medidas *in situ* de la red de irradiancia solar Saver-Net instalada en el sur de América del Sur. Encontrando una correlación relevante ( $R^2$  de 0,95), y

**Tabla 3: Estadísticos asociados a los productos de ET real.**

Producto	Número de datos	RMSE [mm d <sup>-1</sup> ]	MAE [mm d <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>	Me [mm d <sup>-1</sup> ]	RSD [mm d <sup>-1</sup> ]	NSE
TerraClimate	399	1.2	0.9	0.6	0.8	0.5	-1.7
MOD16A2	1722	0.8	0.6	0.6	0.6	0.3	0.4
SVR	97161	0.6	0.4	0.67	0.9	0.5	0.66

**Tabla 3: . Estadísticos asociados a los productos de ETp<sub>Hargreaves</sub>**

Producto	Número de datos	RMSE [mm d <sup>-1</sup> ]	MAE [mm d <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>	Me [mm d <sup>-1</sup> ]	RSD [mm d <sup>-1</sup> ]	NSE
TerraClimate	399	1.0	0.8	0.73	-0.8	0.4	0.6
ERA 5	12329	0.8	0.6	0.82	0.4	0.4	0.95
MERRA-2	12329	1.1	0.1	0.81	0.6	0.4	0.88

los errores muestran una diferencia esperable (RMSE de 0,48 kWh m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; MAE de 0,63 kWh m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). En el análisis realizado por Faramiñán *et al.* (2021b), determinaron ET real con datos NASA Power como entrada al algoritmo SVR, comparándolo con datos de 12 estaciones hidrometeorológicas de la RPA. Obteniendo el R<sup>2</sup> (0,67), RMSE (0,54 mm d<sup>-1</sup>) y MAE (0,4 mm d<sup>-1</sup>). Los resultados muestran la factibilidad de aplicar algoritmos de aprendizaje automático para la obtención de valores de ET real en planicies agrícolas.

Respecto de la plataforma *Climate Engine*, que es una aplicación web, de fácil acceso y con diferentes productos con potencial para el análisis hidroclimático, se concluye que posee productos de calidad apropiada para el estudio y análisis avanzado de las cuencas hidrológicas de la región Pampeana Argentina. Estas comparaciones con estudios realizados en distintos sitios de América del Sur indican la factibilidad y variabilidad esperable para la metodología llevada a cabo en este trabajo.

### Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es analizar los productos de evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>), real (ET real) y potencial (ETp), determinados con datos de reanálisis y de satélite, disponibles en la plataforma virtual *Climate Engine*, de fácil acceso para la Región Pampeana Argentina. Además, se evaluó el algoritmo de inteligencia artificial, *Support Vector Machine Regression*, para determinar la ET real y ETp, haciendo uso de los datos de la plataforma NASA Power.

En general, se observa un muy buen comportamiento del conjunto de productos evaluados para su uso en la región de estudio. Dado los errores obtenidos, se puede decir que, en mayor o menor medida, todos pueden ser utilizados para la determinación de la evapotranspiración de referencia, real y potencial. Asimismo, el que presenta mejores resultados (para ET real y ETp) y valores altos del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe es el obtenido mediante inteligencia artificial, teniendo en cuenta que la resolución espacial es de 50 Km por 50 Km, con un bajo nivel de detalle de parcelas.

En particular, para los productos disponibles en la plataforma *Climate Engine*, obtiene mejores resultados el modelo *TerraClimate* para la variable ET<sub>0</sub>, mientras que MOD16A2 muestra errores menores para la ET real, y ERA 5 es más apropiado para determinar la ETp mediante Hargreaves.

### Agradecimientos

Los autores del presente trabajo quieren agradecer a la Secretaría de Ciencia, Arte y Tecnología de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires (UNCPBA) en el marco del programa de Fortalecimiento de la Ciencia y la Tecnología, proyecto Jóvenes Investigadores (03-JO-VIN-711), a la UNCPBA, al Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Jorge Usunoff”, a la Oficina de Riesgo Agropecuario por proporcionar los datos de evapotranspiración de campo, al MSc. Martín Bayala por su colaboración con la confección de las figuras en alta calidad y al Dr. Adán Faramiñán por facilitarnos datos e información acerca del algoritmo SVR. Finalmente, a la alumna de grado, Melina Abdala, por su contribución en la descarga de datos.

### Contribución de autoría

Ambos autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por María Florencia Degano. El primer borrador del manuscrito fue escrito por María Florencia Degano. La revisión del manuscrito fue realizada por Raúl Rivas y ambos autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Ambos autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

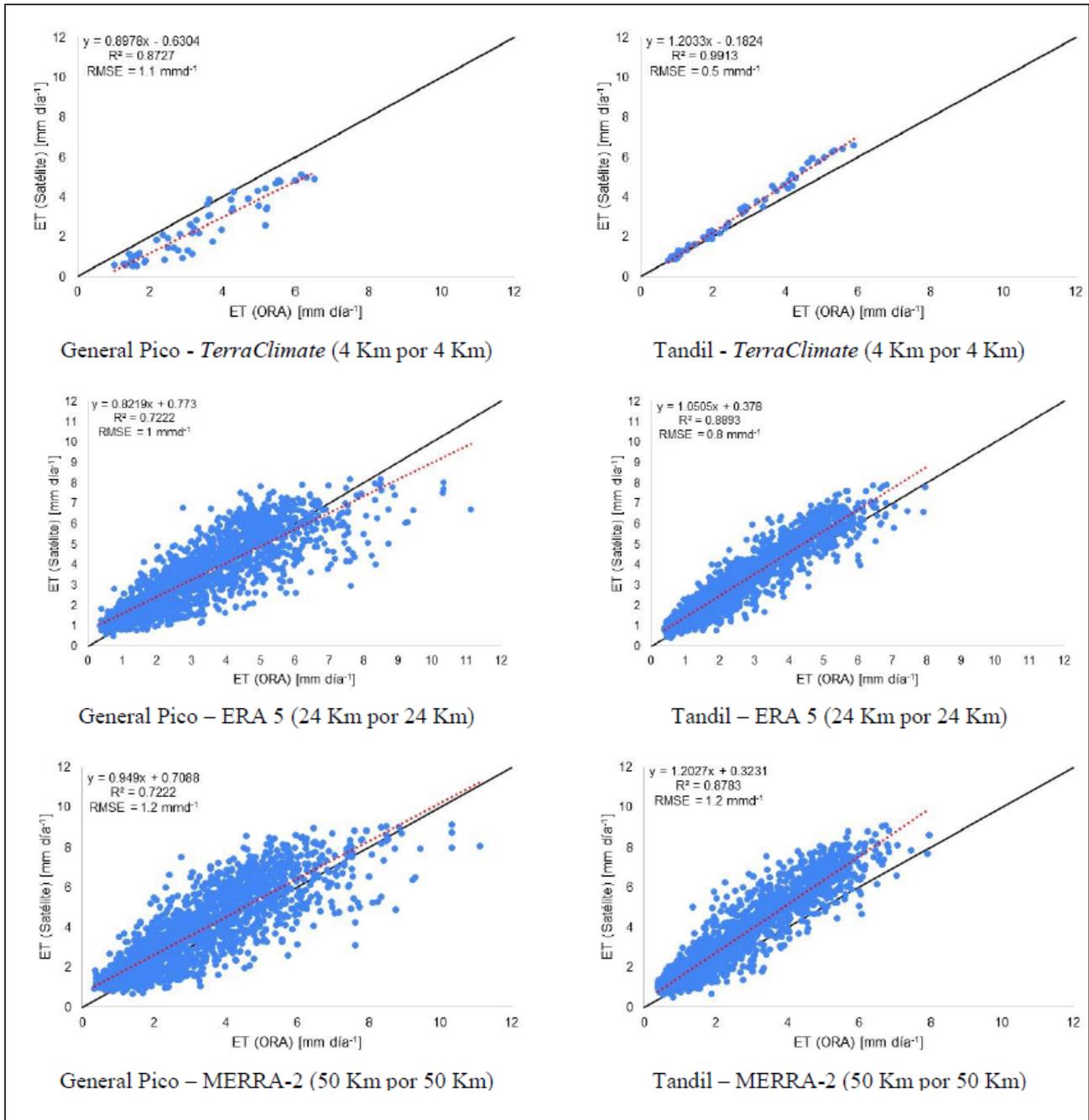


Figura 3: Relación entre los productos de ETp TerraClimate, ERA 5 y MERRA-2 en las estaciones General Pico (semiárida) y Tandil (subhúmeda). Línea negra: relación 1:1. Línea punteada roja: línea de tendencia.

### Declaración de conflictos de intereses

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés

## Referencias bibliográficas

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A. y Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5,170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper N°56. FAO.
- Allen, R., Pereira, L., Howell, T. y Jensen, M. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899-920. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>
- Basualdo, A. (2011). Balance hídrico como herramienta de decisión.. En S. Occhiuzzi, P. Mercuri y C. Pascale (Coords.), *Herramientas para la evaluación y gestión del riesgo climático en el sector agropecuario* (pp. 55-63). (1ª ed.). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.
- Castañeda Calatayud, F. (2020). Análisis del potencial eólico en la Región de Aysén a partir del modelo ERA 5 REANALYSIS. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/183486>
- Chia, M. Y., Huang, Y. F., Koo, C. H. y Fung, K. F. (2020a). Recent advances in evapotranspiration estimation using artificial intelligence approaches with a focus on hybridization techniques—a review. *Agronomy*, 10(1), 101. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010101>.
- Chia, M. Y., Huang, Y. F. y Koo, C. H. (2020b). Support vector machine enhanced empirical reference evapotranspiration estimation with limited meteorological parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105577. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105577>
- Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. *Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)*, date of access. <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- Cristianini, N. y Shawe-Taylor, J. (2000). *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge University press.
- Degano, M. F., Rivas, R. E. y Bayala, M. I. (2023). Determinación de la evapotranspiración con datos satelitales y de reanálisis utilizando Google Earth Engine. *Tecnología y Ciencias del Agua*. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-4-4>
- Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Faramiñán, A. M. G. y Olivera Rodríguez, P. S. (2021a). Calibración del producto de evapotranspiración potencial “MOD16A2” para la Región Pampeana Argentina. *Boletín Geológico y Minero de España*, 132(1-2), 167-174. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.1-2.017>
- Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Niclòs, R. y Sánchez, J. M. (2021b). Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.08.004>
- Fan, J., Yue, W., Wu, L., Zhang, F., Cai, H., Wang, X., Lu, X. y Xiang, Y. (2018). Evaluation of SVM, ELM and four tree-based ensemble models for predicting daily reference evapotranspiration using limited meteorological data in different climates of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 225-241. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.019>
- Faramiñán A. M. G. (2022). Estudio de la evapotranspiración y su aporte en el desarrollo de modelos por medio de medidas directas e inteligencia artificial. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires.
- Faramiñán, A. M. G., Carmona, F., Rivas, R. E., Degano, M. F. y Abadie, P. A. (2021a). Monitoreo de la evapotranspiración real horaria por medio del balance energético y un lisímetro de pesada. *Boletín Geológico y Minero de España*, 132(1-2), 47-56. <http://hdl.handle.net/11336/164282>
- Faramiñán, A. M., Degano, M. F., Carmona, F. y Rodríguez, P. O. (2021 b). Estimation of actual evapotranspiration using NASA-POWER data and Support Vector Machine. En *2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (pp. 1-5). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/RPIC53795.2021.9648425>
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A., Gu, W., .... y Zhao B. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(13), 5419–5454.

- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>
- Huntington, J. L., Hegewisch, K. C., Daudert, B., Morton, C. G., Abatzoglou, J. T., McEvoy, D. J. y Erickson, T. (2017). Climate engine: Cloud computing and visualization of climate and remote sensing data for advanced natural resource monitoring and process understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(11), 2397-2410. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1>
- Juarez, J., Trentin, G. y Heinen, M. (2018). Determinación de evapotranspiración de referencia a partir de modelos de inteligencia artificial. En *X Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 47* (pp. 160-168). Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S. y Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>.
- Lv, M., Xu, Z. y Lv, M. (2020). Evaluating hydrological processes of the atmosphere-vegetation interaction model and ME-RRA-2 at global scale. *Atmosphere*, 12(1), 16.
- McCuen, R. H., Knight, Z. y Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6), 597-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))
- Monteith J. L. y Unsworth M. H. (1990). *Principles of Environmental Physics*. (2ª ed.). E. Arnold.
- Mu, Q. Z., Zhao y M.S., Running, S. W. (2013). MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5. NASA Headquarters. *Numerical Terradynamic Simulation Group*, 268. [https://scholarworks.umd.edu/ntsg\\_pubs/268](https://scholarworks.umd.edu/ntsg_pubs/268)
- Orte, F., Lusi, A., Carmona, F., D'Elia, R., Faramiñán, A. y Wolfram, E. (2021). Comparison of NASA-POWER solar radiation data with ground-based measurements in the south of South America. En *2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RPIC53795.2021.9648428>
- Pereyra, F. X. (2003). *Ecoregiones de la Argentina*. Servicio Geológico Minero Argentino. <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/2953>
- Ritter, A. y Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Ruhoff, A., de Andrade, B. C., Laipelt, L., Fleischmann, A. S., Siqueira, V. A., Moreira, A. A., Barbedo, R., Cyganski, G.L., Fernandez, G.M.R., Brêda, J.P.L.F., Paiva, R.C.D.d., Meller, A., Teixeira, A.d.A., Araújo, A.A., Fuckner, M.A., Biggs, T. (2022). Global Evapotranspiration Datasets Assessment Using Water Balance in South America. *Remote Sensing*, 14(11), 2526. <https://doi.org/10.3390/rs14112526>
- Running, S. W., Mu, Q. Z. y Zhao, M. S. (2017). MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*, 6. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>
- Shrestha, N. K. y Shukla, S. (2015). Support vector machine based modeling of evapotranspiration using hydro-climatic variables in a sub-tropical environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.025>
- Weinzettel P. y Usunoff E. (2001). Cálculo de la recarga mediante la aplicación de la ecuación de Darcy en la zona no saturada. En A. Medina, J. Carrera (Eds.), *Las caras del agua subterránea. Tomo II* (pp. 225-261). IGME.

# Estimación de la recarga potencial de agua subterránea de un acuífero mediante teledetección y sistemas de información geográfica

## Estimation of potential groundwater recharge of an aquifer through remote sensing and geographical information systems

 Rafael Adrián Maddio<sup>1\*</sup>   Ana Cecilia Dufilho<sup>1,2</sup>   Marcelo Luciano Gandini<sup>3</sup> 

\* Contacto

Recibido: 24 de marzo de 2022 • Aceptado: 02 de septiembre de 2022 • Publicado: 31 de julio de 2023

### Resumen

Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas ocupan 41% de la superficie continental terrestre. En estas áreas los recursos hídricos son limitados y se encuentran bajo una severa y creciente presión debido a la expansión de la población, el incremento del uso per cápita y la irrigación. El agua subterránea, ya sea freática o confinada, constituye un factor importante, dado que puede ser una fuente que sirva para suplementar el suministro de otras fuentes o constituir la fuente principal de agua de la zona. El presente estudio se realizó en el acuífero Zapala, provincia del Neuquén, República Argentina. Se implementó el índice de recarga potencial a partir de información obtenida de sensores remotos e información geohidrológica, mediante geoprocesamiento en un Sistema de Información Geográfica. Se encontró que 54% del área de estudio presenta moderado potencial de recarga, 43% buen potencial y 3% muy buen potencial. La recarga anual estimada fue de 74 hm<sup>3</sup>/año, un 63% de precipitación promedio anual. Este resultado fue comparado con estudios previos realizados por otros autores con diferentes métodos. La recarga anual obtenida se encuentra dentro del rango de variación de dichos estudios, por lo que el índice se muestra como una buena aproximación para la estimación de la recarga.

**Palabras clave:** acuífero Zapala, teledetección, proceso de análisis jerárquico.

1. Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud, Universidad Nacional del Comahue

2. Centro de investigación en Geociencias de la Patagonia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue

3. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

## Abstract

The arid, semi-arid, and sub-humid zones cover 41% of the land surface. In these areas, water resources are limited and are under severe and increasing pressure due the increase in population, in per capita use, and in irrigation. Groundwater, whether phreatic or confined, it is an essential water resource to supply for water in the area. This study was carried out in the Zapala aquifer, Neuquén province, Argentine Republic. An index was implemented to estimate aquifer potential recharge from remote sensors data and processing with a Geographic Information System. It was found that 54% of the study area has a moderate recharge potential, 43% has a good potential, and 3% has a leading potential. The estimation of the annual recharge was 74 hm<sup>3</sup> /year, 63% of the average annual precipitation. Compared to previous studies carried out by other authors with different methods. The annual recharge obtained are within the range of variation of these studies, so the index is shown as a good approximation for estimating recharge.

**Keywords:** Zapala aquifer, remote sensing, hierarchical analysis process.

## Introducción

Las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas, son aquellas zonas en las que la proporción entre precipitación anual y evapotranspiración potencial está comprendida entre 0,05 y 0,65, excluidas regiones polares y subpolares (Barbosa y Weynants, 2018). Estas zonas ocupan un 41% de la superficie continental terrestre y son habitadas por el 38% de la población mundial de 6.500 millones de seres humanos (Reynolds *et al.*, 2007). Los recursos hídricos son limitados, y se encuentran bajo una severa y creciente presión, debido a la expansión de la población, el incremento del uso per cápita e irrigación (Wheater, 2007).

La República Argentina, ubicada en el extremo sur del continente americano, posee una superficie total de 3.761.274 km<sup>2</sup>, incluido el territorio antártico e Islas del Atlántico Sur, siendo el octavo país del mundo en superficie (Instituto Geográfico Nacional, 2020). Es el país de América Latina con mayor superficie árida, semiárida y subhúmeda seca, abarcando el 75% del territorio nacional. Las tierras secas de Argentina producen el 50% del valor de producción agrícola, el 47% de la ganadera, y concentran aproximadamente el 30% de la población nacional (9 millones de personas) (Pérez Pardo *et al.*, 2005). Las actividades productivas más importantes se desarrollan en los oasis de riego, que totalizan alrededor de 1,5 millones de hectáreas. Además, concentran 100% de los caprinos y camélidos, el 80% de los ovinos y el 40% de los bovinos (Pérez Pardo *et al.*, 2005).

Múltiples factores determinan la ocurrencia del agua subterránea en acuíferos libres y semiconfinados, incluyendo topografía, litología, estructuras geológicas, profundidad y meteorización de las rocas, extensión de fracturas, porosidad primaria y secundaria, patrones de drenaje, geoformas, usos y coberturas, y clima (Martínez de Azagra, 1996; Yeh *et al.*, 2009; Khodaei y Nassery, 2011). Además, depende de tres procesos importantes, la infiltración de agua superficial para convertirse en humedad de suelo, el flujo subsuperficial o flujo no saturado a través del suelo, y el flujo de agua subterránea o flujo saturado a través del suelo o roca (Chow, 2000). El estudio de estos factores y procesos a través de

métodos de campo puede resultar poco viable, debido a la accesibilidad a los sitios de observación, los costos, el tiempo y el requerimiento de mano de obra calificada. Además, en los países en desarrollo, existe una débil infraestructura, así como una baja accesibilidad y escasez de datos (Avtar *et al.*, 2010).

En este contexto, cabe destacar que los estudios basados en los sensores remotos satelitales y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han demostrado ser de gran utilidad y bajo costo, para cartografiar y monitorear recursos hídricos (Yeh *et al.*, 2009; Khodaei y Nassery, 2011, Tumare *et al.*, 2014; Macas-Espinosa y López-Escobar, 2018). En el presente estudio, se aplicó un índice para estimar la recarga potencial utilizando parámetros derivados de sensores remotos satelitales y datos geohidrológicos procesados mediante SIG, en el acuífero Zapala, provincia del Neuquén, República Argentina.

## Materiales y métodos

El estudio tuvo lugar en el área comprendida por el acuífero Zapala, alojado en la formación La Bardita, cuyos límites se encuentran en discusión (Duffilho, 2017). La formación La Bardita de edad miocena se depositó sobre rocas mesozoicas y está cubierta por rocas eruptivas en la zona central y oeste y por sedimentos modernos hacia el noreste. Se trata de una sucesión de niveles conglomerádicos polimícticos a los que se encuentran asociados areniscas, fangolitas, y tufitas. Estos niveles, pueden alcanzar individualmente hasta 1 m de espesor y poseen clastos bien redondeados de volcánitas mesosilíceas de tonos oscuros que alcanzan hasta 5 cm de diámetro (Leanza *et al.*, 2001). En el área se encuentran las formaciones continentales Las Coloradas (Pleistoceno) y Pampa Encina (Plioceno), constituidas por conglomerados y areniscas. Las rocas eruptivas del área son las formaciones Michacheo (Mioceno), Zapala (Plioceno), Macho Viejo (Pleistoceno), Los Mellizos (Pleistoceno) y Laguna Blanca (Plioceno), que se presentan bajo el aspecto de extensos mantos lávicos y piroclastos. Las coladas están dispuestas subhori-

zontalmente y exhiben muy escasa a nula deformación. Su litología, corresponde a basaltos olivínicos que se caracterizan por sus dominantes tonalidades gris plomo, de textura granosa fina, constituida por un mineral máfico alterado en partes y feldespato (Leanza *et al.*, 2001). Los sedimentos modernos están formados por gravas, arenas y limos de origen aluvial y remoción en masa mientras que los depósitos más finos se ubican en los bajos y mallines (Leanza *et al.*, 2001).

En la Figura 1 se presenta en rojo el límite del acuífero considerado en este estudio que abarca 838 km<sup>2</sup> y comprende la totalidad de la formación La Bardita, mientras que en amarillo se representa el acuífero detrítico con un área de 207 km<sup>2</sup>. El acuífero detrítico de alta productividad se utiliza para el abastecimiento de agua potable para la población de la ciudad de Zapala, mientras que el otro límite considera además las zonas de menos productividad (acuíferos pobres y acuitardos) que sirven de aprovisionamiento de agua para los pobladores rurales.

El área está limitada por la cuenca del arroyo Covunco al noroeste, hacia el sur por el arroyo Santo Domingo, al oeste por el lago Laguna Blanca y al este por estribaciones que presentan vertientes de la Fm. La Bardita. Hacia el oeste, la existencia de coladas volcánicas determina un relieve mesetiforme, plano a suavemente inclinado con pendiente inferior al 12%, mientras que, hacia el este, el relieve es de colinas suaves debido a la presencia de rocas sedimentarias pedimentadas. El relieve es maduro y estable en el 90% del

área, con zonas inestables por arriba de los 1400 m s.n.m. correspondiente a picos volcánicos, y por debajo de los 900 msnm correspondiente a los taludes pronunciados en los bordes de las coladas volcánicas y las laderas de los valles aluviales del arroyo Santo Domingo al sur.

La precipitación se estima entre 180 mm/anales (Bastianelli *et al.* 2016, periodo 1990-2015), los mayores registros se observan hacia el oeste, decreciendo hacia el este (Bonorino *et al.*, 2002). Las temperaturas máximas pueden superar los 40°C y las temperaturas mínimas descender a -14°C. La temperatura media en el mes de enero, máxima en el año, es de alrededor de 22°C, mientras que en los meses de junio y julio se registran las mínimas con una media de -6°C durante varios días. La humedad relativa media ronda 55% con fuerte predominio de la aridez en el clima. La evapotranspiración estimada mediante el método de Penman-Monteith es de 1364 mm/año, mientras que la estimada mediante el método de Thornthwaite es de 730 mm/año, considerándose el máximo y mínimo probable para el área (Bonorino *et al.*, 2002). Dentro del área, los cauces son efímeros, únicamente activos durante fuertes precipitaciones, forman una red de drenaje poco desarrollada con fuerte control estructural en la zona de afloramientos lávicos. Existen, además numerosas lagunas temporarias asociadas al acuífero libre, ubicadas en los bajos. El llenado y vaciado de estas lagunas demuestra la importancia de las precipitaciones, la rápida infiltración, y evidencia la existencia de un sistema acuífero acotado y de

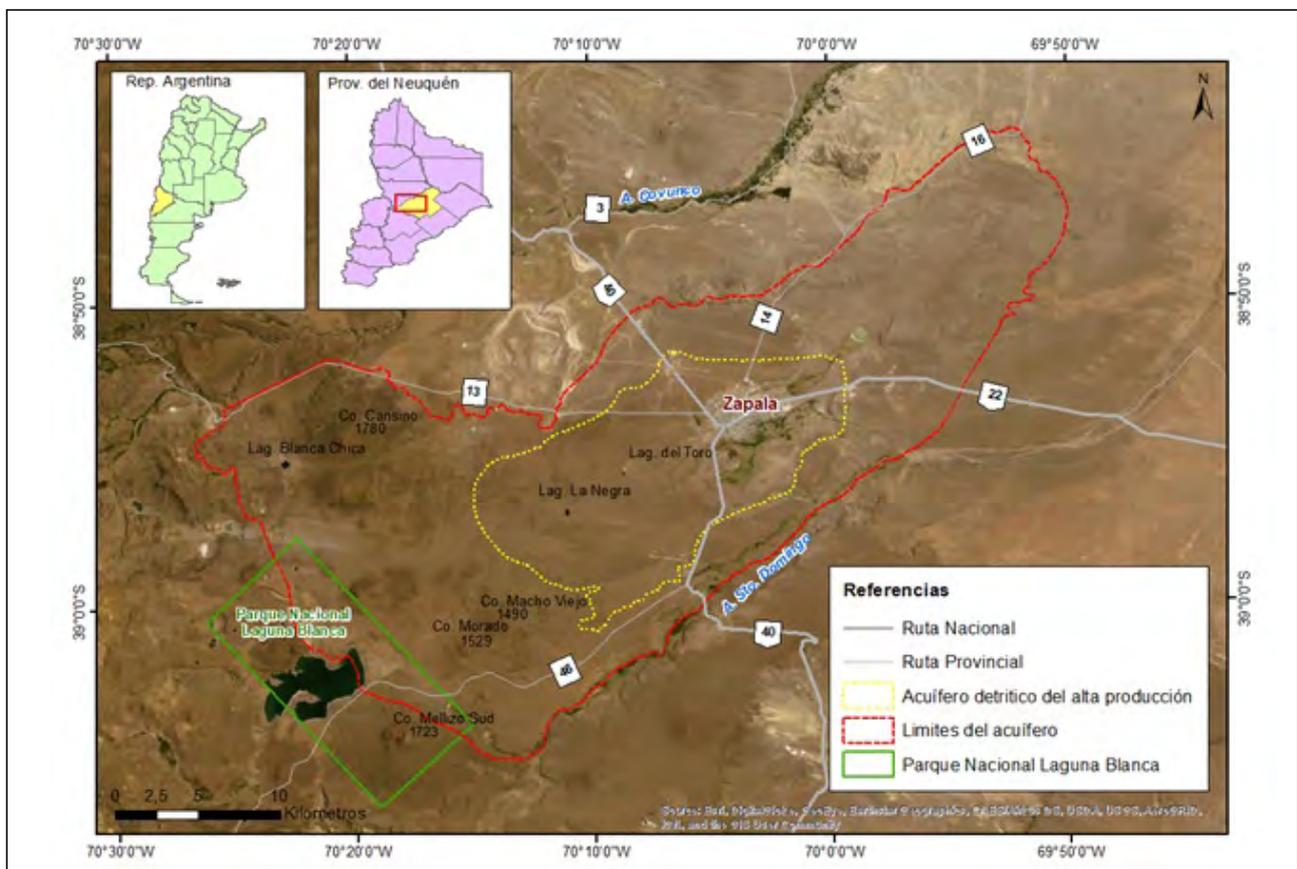


Figura 1. Área de estudio. Imagen base: ESRI World Imagery Tile Layer, color natural.

rápida respuesta (Bastianelli *et al.* 2016).

La estepa arbustiva impera en el área, predominan arbustos xeromórficos con abundantes espinas, hojas resinosas pequeñas y profundas raíces. Cubriendo una menor superficie y en forma discontinua aparece la estepa herbácea constituida por pequeñas plantas anuales y algunas gramíneas perennes. La vegetación se encuentra dispersa, con porcentajes de cobertura entre 30 y 40% (Matteucci *et al.* 2012), y en sitios de pastoreo excesivo se encuentra una mayor longitud interparche, una disminución en la cobertura basal, menor cobertura de gramíneas palatables y mayor de no palatables (Gaitán *et al.* 2009<sup>a</sup>). Pese a las condiciones generales de escasez de agua, es posible encontrar en el paisaje pequeñas "islas" de vegetación hidrófila y mesófitas, localmente denominados mallines o vegas. Son sitios en los que el agua permanece en el horizonte del suelo en forma permanente, dando lugar a la formación de abundante materia orgánica, alta densidad de individuos de especies y cobertura vegetales total entre 90 y 100% (Gaitán *et al.*, 2009<sup>b</sup>; Ramilo *et al.*, 1993).

El Índice de Recarga Potencial (IRP) se estimó siguiendo la metodología propuesta por Yeh *et al.* (2009). El IRP se obtuvo de acuerdo con la ecuación 1.

$$IRP = \sum w_i r_i \quad (1)$$

Dónde  $w_i$  es el peso del factor  $i$ -ésimo,  $r_i$  es la tasa del factor, y los subíndices se refieren a las características individuales de un factor.

Los factores seleccionados para el análisis fueron la litología y suelos, los usos y la cobertura del suelo, y se decidió incorporar el Índice Topográfico de Humedad (ITH) de Carson y Kirkby (1972), en reemplazo de las pendientes, la densidad de lineamientos y la densidad de la red de drenaje, como se explica en párrafos posteriores. Se asignó pesos a las categorías individuales de cada factor en base a revisión bibliográfica, utilizando la herramienta reclassify del SIG. Luego, se obtuvo el IRP como la suma ponderada de factores en la calculadora raster. La capa temática obtenida correspondiente al IRP fue clasificada en cinco intervalos iguales correspondientes a las categorías de potencial recarga: muy buena, buena, moderada, moderadamente baja y baja.

Los materiales utilizados fueron:

- Imagen satelital Landsat 8: path: 232, row: 87, tomada el 25 de febrero de 2016, descargada del sitio web del United State Geological Survey (2016) en su formato de procesamiento nivel 2.

- Modelo digital de elevaciones (MDE): SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Void Filled 1 Arc-second Global descargado del sitio web del USGS (2016). Los datos de elevación de este producto presentan relleno de huecos, una resolución espacial de 30 metros, con una precisión horizontal y vertical cercana a 20 metros y 16 metros respectivamente (error lineal al 90% de confianza) (Smith y Sandwell, 2003).

- Cartas geológicas: 3969-I Zapala (Leanza *et al.* 2001) y 3969-III Picún Leufú (Leanza *et al.* 1997), ambas de escala 1:250.000.

- Datos de precipitaciones: capa temática de precipitaciones medias anuales extraída del SIG-OTA (Duffilho *et al.* 2002) en formato ESRI shape file. Los datos pluviométricos corresponden al periodo 1921-1950, compilados por el Servicio Meteorológico Nacional (Arroyo, 1980),

- Software: ArcGIS 10.6.

Los datos de litología y suelos fueron digitalizados a partir de las cartas geológicas. Las hojas fueron escaneadas, y posteriormente georreferenciadas en ArcGIS mediante la herramienta georeferencing. La escala fue aumentada mediante la interpretación visual de imágenes satelitales Landsat 8 y el sombreado topográfico obtenido del MDE SRTM mediante la herramienta *hillshade*. Se generó una capa vectorial con la interpretación, que posteriormente se transformó a formato ráster con la herramienta *polygon to raster*. Se obtuvo un ráster de resolución espacial 30 m.

La capa temática de coberturas y usos del suelo se construyó a partir de la clasificación supervisada de la imagen satelital, aplicándose las categorías del sistema de Clasificación Modificado de UNESCO (MUC) de nivel 1 (Global Learning and Observations to Benefit the Environment, 2005) (Tabla 1). Para la clasificación se utilizó el algoritmo de clasificación de máxima probabilidad. Posteriormente se evaluó la exactitud de la clasificación mediante una matriz de confusión (Global Learning and Observations to Benefit the Environment, 2005), tomando 100 puntos de control obtenidos mediante un muestreo aleatorio. Además, en campo se cuantificó la proporción de suelo cubierto por plantas, rocas, mantillo y costra biológica, mediante 35 líneas de intercepción, siguiendo la metodología de Herrick *et al.* (2017).

Se decidió utilizar el ITH debido a la ausencia de lineamientos en el área y el escaso desarrollo de la red de drenaje. Este índice modela la dinámica de los flujos superficiales basado en el control topográfico del escurrimiento, combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y la pendiente de esta, y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos (Carson y Kirkby, 1972). Para el cálculo del ITH se obtuvo primeramente la tangente de la pendiente expresada en radianes (TS, por su sigla en inglés), y el área de contribución aguas arriba en  $m^2$  (UCA, por su sigla en inglés). Para calcular la TS se obtuvo la pendiente en grados mediante la herramienta *slope*, y luego se transformó en radianes con la calculadora ráster mediante la Ecuación (2). Seguidamente, se calculó la TS, reemplazando los valores de pendiente de valor cero por una constante para evitar la división por cero (Ecuación 3). El UCA se obtuvo a partir de la capa de acumulación de flujo obtenida con la herramienta *flow accumulation* que calcula el flujo acumulado como el peso acumulado para cada celda, determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente (Environmental Systems Research Institute, 2022). Se sumó una

Tabla 1: Clases de usos y coberturas MUC. Fuente GLOBE, 2005.

MUC Código	Clases MUC de Nivel 1	Cobertura Precisa
0	Bosque Cerrado	>40% árboles, al menos de 5 metros de alto con copas tocándose
1	Zona Arbolada	>40% árboles al menos de 5 metros de alto, no se tocan las copas
2	Zona Arbustiva o de Matorral	>40% de arbustos o matorrales, entre 0,5 m. y 5 m. de altura
3	Arbustos Enanos o Subarbustivo	>40% de arbustos por debajo de 0,5 m. de altura
4	Vegetación Herbácea	>60% de plantas herbáceas, hierba, y otras (de hoja ancha)
5	Suelo Desnudo	<40% de cobertura vegetal
6	Humedales	>40% de cobertura vegetal, incluye pantanos, marismas.
7	Cuerpos de Agua	>60% de cuerpos de agua
8	Zona de Cultivo	>60% especies agrícolas
9	Urbano	>40% cobertura urbana (construcciones, áreas asfaltadas)

constante a la acumulación de flujo para evitar el logaritmo natural de cero, y se multiplicó por el área del píxel (Ecuación 4). Finalmente, el ITH se obtuvo siguiendo la Ecuación 5. La capa resultante fue clasificada en cuatro clases por rupturas naturales.

$$SR = \frac{slope \times 1,570796}{90} \quad (2)$$

$$TS = con(SR > 0, tan(SR), 0,001) \quad (3)$$

$$UCA = (FlowAccumulation + 1) \times 900 \quad (4)$$

$$ITH = \ln \frac{UCA}{TS} \quad (5)$$

Se analizaron los factores litología y suelos, usos y coberturas del suelo, flujo de acumulación y pendientes mediante un proceso de análisis jerárquico para establecer el peso de cada uno siguiendo la metodología de comparación de pares propuesta por Saaty (1980). Se calculó el índice de consistencia (IC) y la razón de consistencia (RC) para estimar el grado de consistencia de la asignación de pesos en la matriz de comparación de pares (Ecuaciones 6 y 7).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$RC = \frac{IC}{RI} \quad (7)$$

El término  $\lambda_{max}$  es el valor característico promedio de los pesos asignados en la matriz de comparación de pares, n el tamaño de la matriz y RI la razón de inconsistencia. Para obtener  $\lambda_{max}$ , se calculó el vector de pesos W como el promedio de los componentes de cada fila de la matriz de com-

paración de pares. Se multiplicó la matriz por el vector W para obtener el vector V. Se dividió los componentes V por los componentes W para obtener V''. Finalmente, se obtuvo el valor de  $\lambda_{max}$  como un promedio de los componentes del vector V''. RI es un índice aleatorio tabulado por Saaty (1980).

Se realizaron 41 ensayos de infiltración con infiltrómetros de doble anillo, uno de diámetro interno de 20 cm y altura de 30 cm, y otro de 6,03 cm de diámetro interno y 17,5 cm de altura. Los anillos se insertaron en el suelo a la profundidad mínima necesaria para evitar la fuga de agua durante el ensayo. Los datos obtenidos de campo se volcaron en una planilla registrándose las distintas alturas de agua y los tiempos correspondientes. Los intervalos de tiempo fueron 0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00; 3,00; 5,00; 6,00; 10,00; 15,00; 20,00; 25,00 y 30,00 minutos. La capacidad de infiltración del suelo (mm/h) se obtuvo haciendo el cociente entre cantidad de agua infiltrada y el intervalo de tiempo mediante la ecuación de Horton.

Finalmente, se estimó la recarga anual multiplicando la capa del IRP y la capa de precipitaciones medias anuales en la calculadora ráster. Para esto, primero se convirtió a formato ráster la capa vectorial de precipitaciones con la herramienta *polygon to raster*. Se obtuvo un ráster de tamaño de píxel de 30 m. El resultado obtenido fue comparado con la estimación obtenida por Carrica *et al.* (1997) y Bonorino *et al.* (2002) mediante métodos hidrológicos, y el índice geohidrológico aplicado por Gatica *et al.* (2018).

## Resultados

La capa de litología y suelos (Figura 2) mostró que el área presenta un 4% de afloramientos de la formación La Bardita, las formaciones continentales Las Coloradas (Pleistoceno) y Pampa Encina, abarcan 8% y 0.98% del área respectivamente, las rocas eruptivas representan aproximada-

mente 55% de los afloramientos del área y los sedimentos modernos cubren el 32% del área.

Se obtuvo la capa de uso y cobertura del suelo (Figura 3) con una precisión global de 88%. La categoría de cobertura predominante para el área es de tipo subarbusitivo con un 66,9% del total del área, seguida por facies de matorrales arbustivos (12%), áreas de vegetación herbácea (10,2%), suelo desnudo (6,3%), zonas urbanizadas (3,6%), cuerpos de agua (0,5%), y humedales (0,4%).

La Tabla 2 presenta los porcentajes de cobertura de suelo promedio para las principales formaciones obtenidos mediante las transectas. La cobertura total promedio para el

área de estudio es de 62,08%, con un mínimo de cobertura total de 50% en los Depósitos que Cubren Superficies Pedimentadas de Flanco, y cercanos al 100% en los Depósitos de Bajos y Mallines, aunque no se realizaron mediciones en esta formación. La cobertura basal observada es baja debido a la baja densidad de individuos que presentan estos ambientes. La proporción de suelo desnudo promedio es de 37,92%. La cobertura del sustrato por rocas, lecho rocoso y mantillo favorece la infiltración y ofrece protección al suelo frente a procesos de erosión. La cobertura foliar del área no supera el 50%, a excepción de los depósitos de bajos, mallines (humedales) y lagunas (cuerpos de agua), donde la cobertura foliar corresponde en su totalidad a vegetación herbácea y es

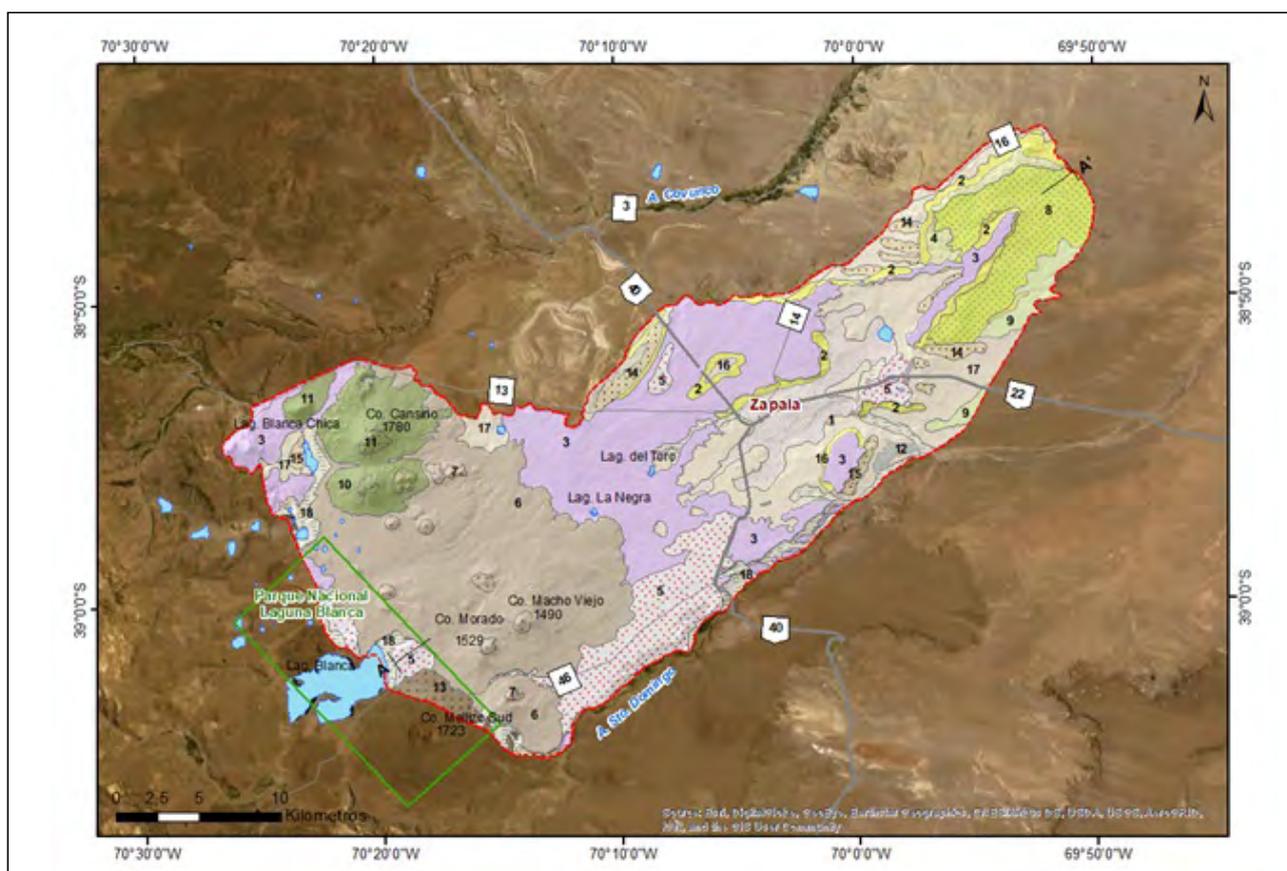


Figura 2. Litología y suelos del área de estudio. Fuente: Leanza et al. (1997, 2001).

Tabla 2: Cobertura del suelo por formación geológica.

Formación	n	Cobertura total %	Cobertura foliar %	Cobertura basal %	Suelo desnudo %
Basalto Macho Viejo facies lávica	14	64,08	30,54	1,54	35,92
Basalto Zapala facies lávica	8	65,33	45,44	1,33	34,67
Depósitos aluviales actuales	1	62,00	47,00	2,00	38,00
Depósitos aluviales coluviales	3	60,33	44,67	2,33	39,67
Depósitos que cubren superficies pedimentadas de flanco	2	50,00	40,00	4,00	50,00
Las Coloradas	7	70,71	36,57	4,14	29,29

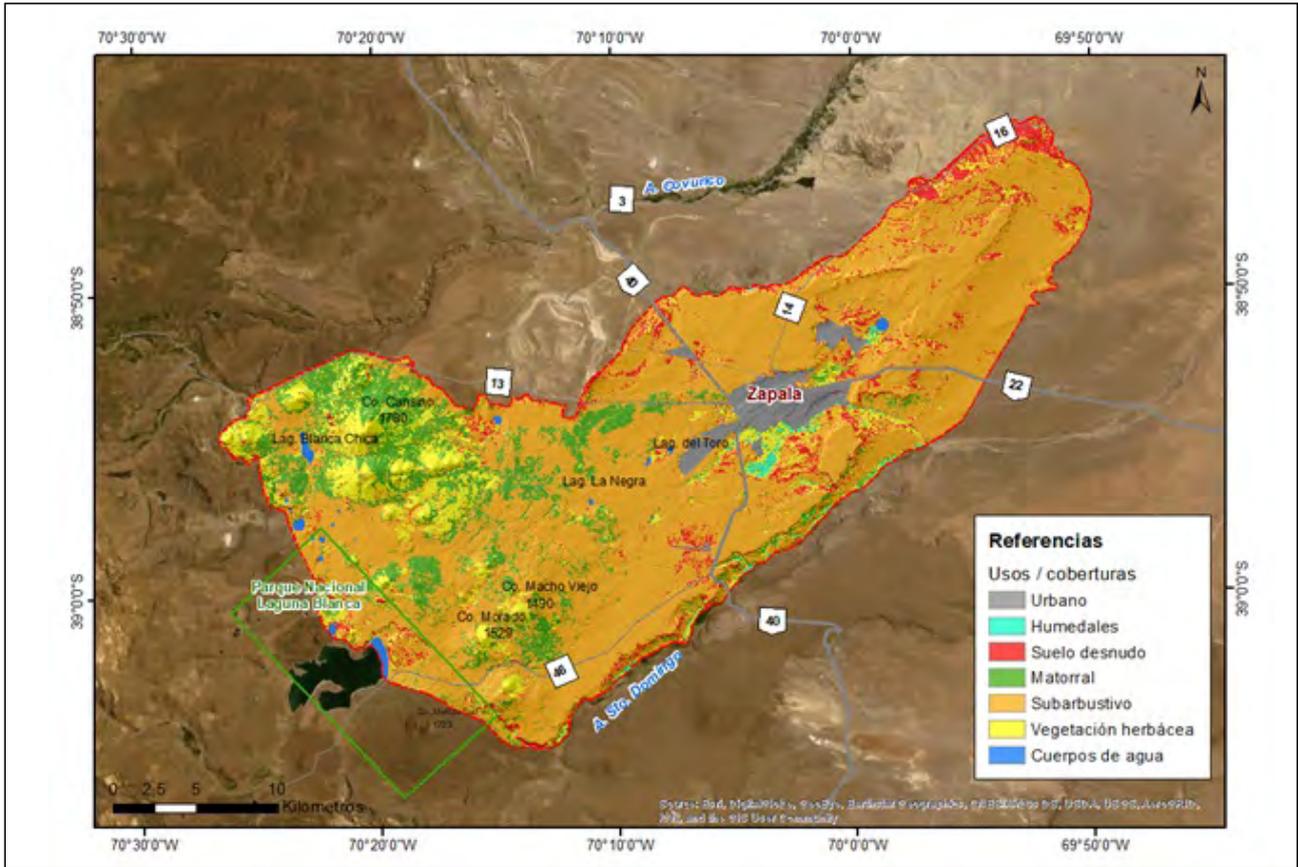


Figura 3. Uso y cobertura del suelo del área de estudio.

Tabla 3. Matriz de comparación de factores.

	Flujo acumulado	Pendiente	Litología y suelos	Uso y cobertura	Suelo desnudo %
Flujo acumulado	1	1	1/3	3	35,92
Pendiente	1	1	1/3	3	34,67
Litología y suelos	3	3	1	5	38,00
Uso y cobertura	1/3	1/3	1/5	1	39,67
Suma	5,33	5,33	1,83	12	50,00
Las Coloradas	7	70,71	36,57	4,14	29,29

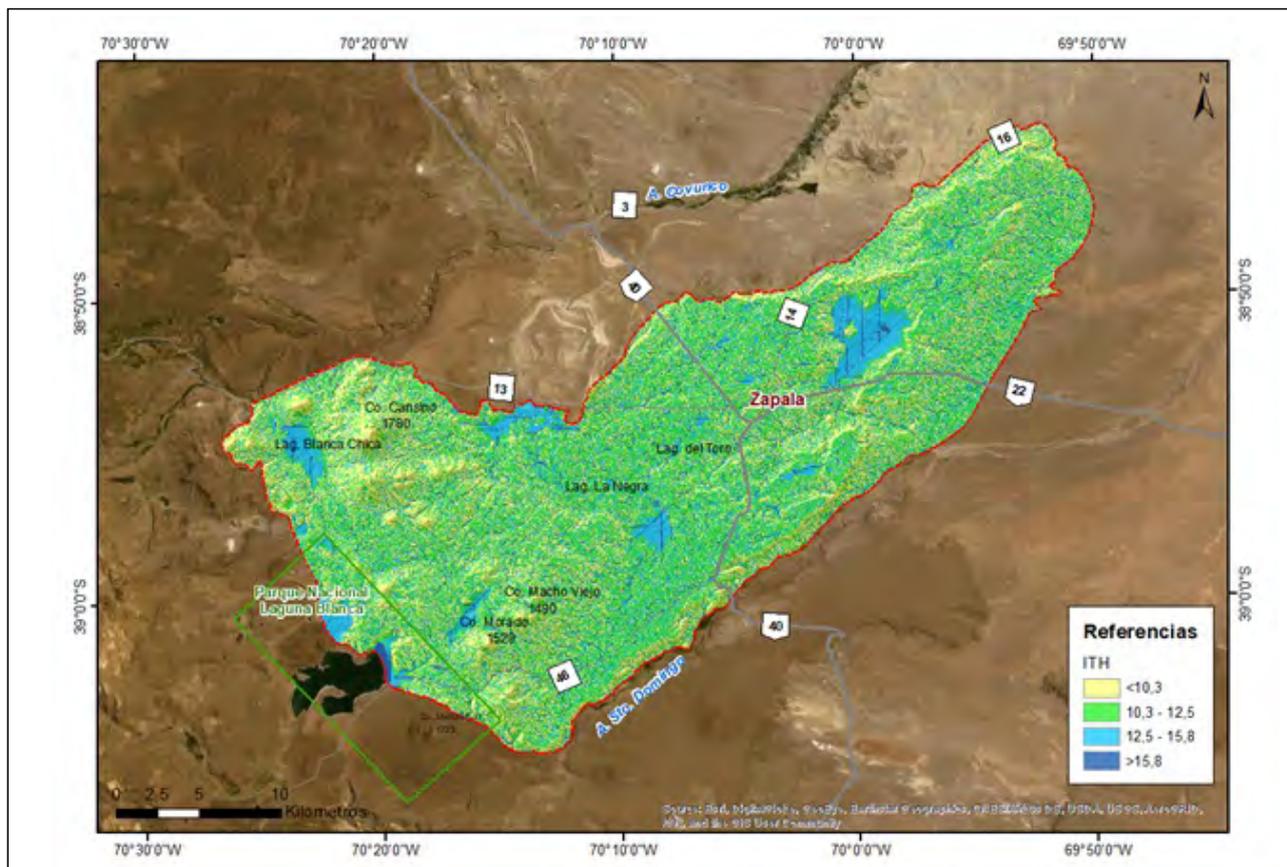
cercana al 100%. La baja altura de la vegetación de la estepa arbustiva hace despreciable el efecto de la caída de las gotas de lluvia desde las ramas.

El ITH presentó un valor mínimo de 5,95 y un máximo de 27,98, con una media de 11,22, y un desvío estándar de 2,22. Las cuatro categorías obtenidas representan áreas de alta pendiente y baja acumulación de flujo (<10,3), áreas planas con baja acumulación de flujo (10,3-12,5), depresiones que favorecen la acumulación de flujo (12,5-15,8), y áreas de baja pendiente y alta acumulación de flujo, coincidentes con cauces temporarios y lagunas (>15,8) (Figura 4). Las categorías comprendieron 33%, 42%, 20% y 5% del área, respectivamente.

Los resultados del análisis de las relaciones entre factores mediante la matriz de comparación de pares de Saaty se presentan en la Tabla 3. La litología y suelos obtuvieron la mayor importancia, le siguieron el flujo acumulado, las pendientes, y en último lugar el uso y cobertura de suelo. El valor característico promedio fue de 4,022 (Tabla 4). Los resultados del análisis jerárquico fueron consistentes, obteniéndose un índice de consistencia de 0,007, y una razón de consistencia de 0,008, tomando una consistencia aleatoria para un n de 4 igual a 0,9. La mayor valoración fue asignada a la litología y suelos (5) debido a que afecta directamente la conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, y consecuentemente la recarga de agua subterránea. El ITH comprende las pendientes y el flujo acu-

**Tabla 4. Matriz normalizada y vector de prioridad.**

	Flujo acumulado	Pendiente	Litología y suelos	Uso y cobertura	W	V	V'
Flujo acumulado	0,188	0,188	0,182	0,250	0,202	0,811	4,020
Pendiente	0,188	0,188	0,164	0,250	0,197	0,793	4,024
Litología y suelos	0,563	0,563	0,545	0,417	0,522	2,115	4,054
Uso y cobertura	0,063	0,063	0,109	0,083	0,079	0,317	3,990
Suma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		ΛMAX = 4,022
Las Coloradas	7	70,71	36,57	4,14	29,29		



**Figura 4. Índice Topográfico de Humedad.**

mulado, y se le asignó un valor de 4. La menor valoración fue asignada a uso y cobertura (1).

La Tabla 5 presenta los pesos asignados a las categorías de cada factor. Los pesos de la litología y suelos fueron asignados de acuerdo con la estructura y grado de meteorización que presentan las formaciones. En el caso de los basaltos se valoró los mismos considerando su antigüedad, asignando los menores valores a los basaltos más antiguos, debido a que, en zonas áridas tras largos períodos secos, pequeñas partículas de sedimentos finos se depositan ocluyendo los poros (Martínez de Azagra, 1996). En el caso del factor usos y coberturas, se consideró la cobertura foliar y la densidad de individuos de las coberturas vegetales. La cobertura foliar influye en la interceptación de la precipitación, mientras que la densidad de individuos aumenta la cobertura basal, disminu-

yendo la velocidad de escorrentía superficial y consecuentemente aumenta el tiempo disponible para la infiltración. La cobertura urbana obtuvo la menor puntuación debido a la alta proporción de superficies impermeables que presenta este uso del suelo. Los humedales también obtuvieron una baja puntuación debido a que en el área de estudio representan áreas de descarga. La mayor puntuación de cobertura fue asignada a las lagunas y cuerpos de agua, que corresponden a topografías bajas que representan áreas de recarga en valles aluviales áridos. Las categorías del ITH fueron ponderadas en función de su posición topográfica, puntuándose de mayor a menor valor del índice.

La capa temática correspondiente al IRP permitió identificar las zonas de recarga potencial muy buena (80-100), buena (60-80) y moderada (40-60). No se encontraron zonas

Tabla 5. Factores ponderados.

Factor	Propiedad del efecto	Peso	Valoración	Peso asignado
Litología y suelos	Basalto Laguna Blanca	7	5	35
	Basalto Los Mellizos facies piroclástica	10		50
	Basalto Los Mellizos facies lávica	9		45
	Basalto Michacheo	7		35
	Basalto Macho Viejo facies piroclástica	10		50
	Basalto Macho Viejo facies lávica	7		35
	Basalto Zapala facies lávica	6		30
	Depósitos aluviales actuales	7		35
	Depósitos aluviales y coluviales	6		30
	Depósitos de bajos, mallines y lagunas	6		30
	Depósitos de remoción en masa	9		45
	Depósitos que cubren superficies pedimentadas de flanco	9		45
	Depósitos de terrazas del cañadón Santo Domingo	6		30
	Depósitos del antiguo abanico aluvial del cañadón Santo Domingo	6		30
	Depósitos que cubren el primer nivel de pedimentos	6		30
	Formación Las Coloradas (continental)	6		30
	Formación Pampa Encina (continental)	6		30
	Formación La Bardita (continental)	6		30
Usos y coberturas	Arbustivo o Matorral	5	1	5
	Subarbustivo	6		6
	Vegetación Herbácea	7		7
	Suelo Desnudo	4		4
	Humedales	3		3
	Cuerpos de Agua	10		10
	Urbano	1		1
ITH	>15.8	10	4	40
	12.5-15.8	8		32
	10.3-12.5	6		24
	<10.3	4		16

de recarga moderadamente baja (20-40) y baja (0-20) (Figura 5). La superficie correspondiente a la recarga potencial moderada representa un 54%, y corresponde principalmente a las formaciones Basalto Zapala, Las Coloradas y Depósitos de Bajos, Mallines y Lagunas. Las áreas de recarga potencial buena representan un 43% del área y se ubican sobre las formaciones Basalto Macho Viejo facies lávica y Basalto Los Mellizos facies lávica. Las áreas de muy buen potencial de recarga abarcan un 3% del área y se corresponden con las formaciones Lagunas Blanca, Blanca Chica, La Negra; y cursos de drenaje intermitentes. El potencial de infiltración disminuye en aquellas áreas de altas pendientes, rocas poco meteorizadas, y/o texturas muy finas. En el área, las mayores pendientes corresponden a los conos volcánicos formados por las facies piroclásticas de las formaciones basálticas, que

presentan textura gruesa y una alta capacidad de infiltración. Por otra parte, los bajos y depósitos de texturas más finas tienen una rápida respuesta a las precipitaciones, fluctuando como área de recarga y descarga. Debido a esto, no se registraron áreas de bajo y moderadamente bajo potencial de infiltración.

La Figura 6 muestra los sitios de ensayo de infiltración y la Tabla 6 presenta la infiltración básica promedio y desvío estándar de cada formación ensayada. En todos los casos se observó una alta capacidad de infiltración al inicio de los ensayos, coincidente con la ausencia de precipitaciones durante un periodo de 30 días previo a la realización. La totalidad de los ensayos evidenciaron una alta capacidad de infiltración básica, correspondiente a suelo de textura arenosa y

areno limosos, correspondientes a suelos del grupo A de la clasificación hidrológica de suelos del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972). Los suelos presentan una rápida infiltración aun estando húmedos, infiltración superior a 76 mm/h. El descenso de la capacidad de infiltración es abrupto, llegando rápidamente a la condición de equilibrio del flujo, es decir la capacidad de infiltración básica. Esta condición refleja la situación de suelos gruesos con baja capacidad de almacenamiento y alta infiltración básica. Estos valores elevados de infiltración medidos en el campo corroboran la ausencia de zonas con bajo y moderadamente bajo valor del IRP y justifican la existencia de 46% del área que presenta buena y muy buena capacidad de recarga. El menor valor de infil-

tración básica promedio se ubica en la formación de bajos, mallines y lagunas, debido a la presencia de depósitos finos y a la compactación del suelo por el uso de estas áreas para la ganadería extensiva. El valor de infiltración básica promedio más elevado se registró en la formación Basalto Zapala facies lávica; esto contradujo los antecedentes bibliográficos considerados, que establecían que, en las zonas áridas tras largos períodos secos, se depositan partículas pequeñas que ocluyen los poros. Este hecho afectó la asignación de pesos de las formaciones basálticas, habiendo subestimado la valoración de las formaciones basálticas más antiguas.

El valor anual de recarga potencial estimada fue de 74

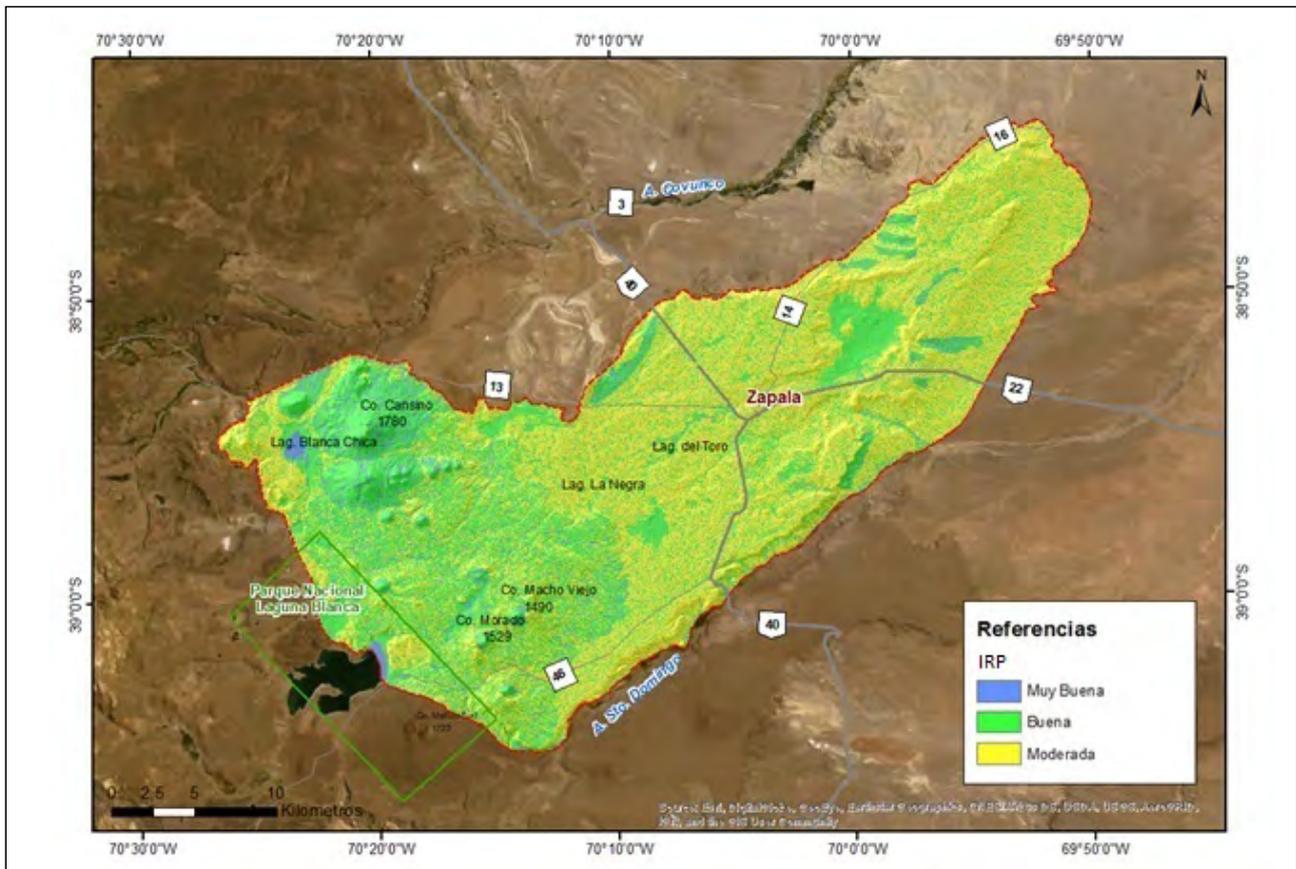


Figura 5. Índice de Recarga Potencial.

Tabla 6. Ensayos de infiltración por formación geológica.

Formación	n	Infiltración básica promedio (mm/h)	Desvío estándar
Basalto Macho Viejo facies lávica	14	527,79	206,99
Basalto Zapala facies lávica	8	583,25	240,63
Basalto Los Mellizos facies lávica	1	540,00	-
Depósitos aluviales actuales	1	252,00	-
Depósitos aluviales y coluviales	3	578,33	210,40
Depósitos de bajos, mallines y lagunas	5	250,60	210,46
Depósitos que cubren superficies pedimentadas de flanco	2	453,00	188,09
Las Coloradas (continental)	7	452,57	234,25

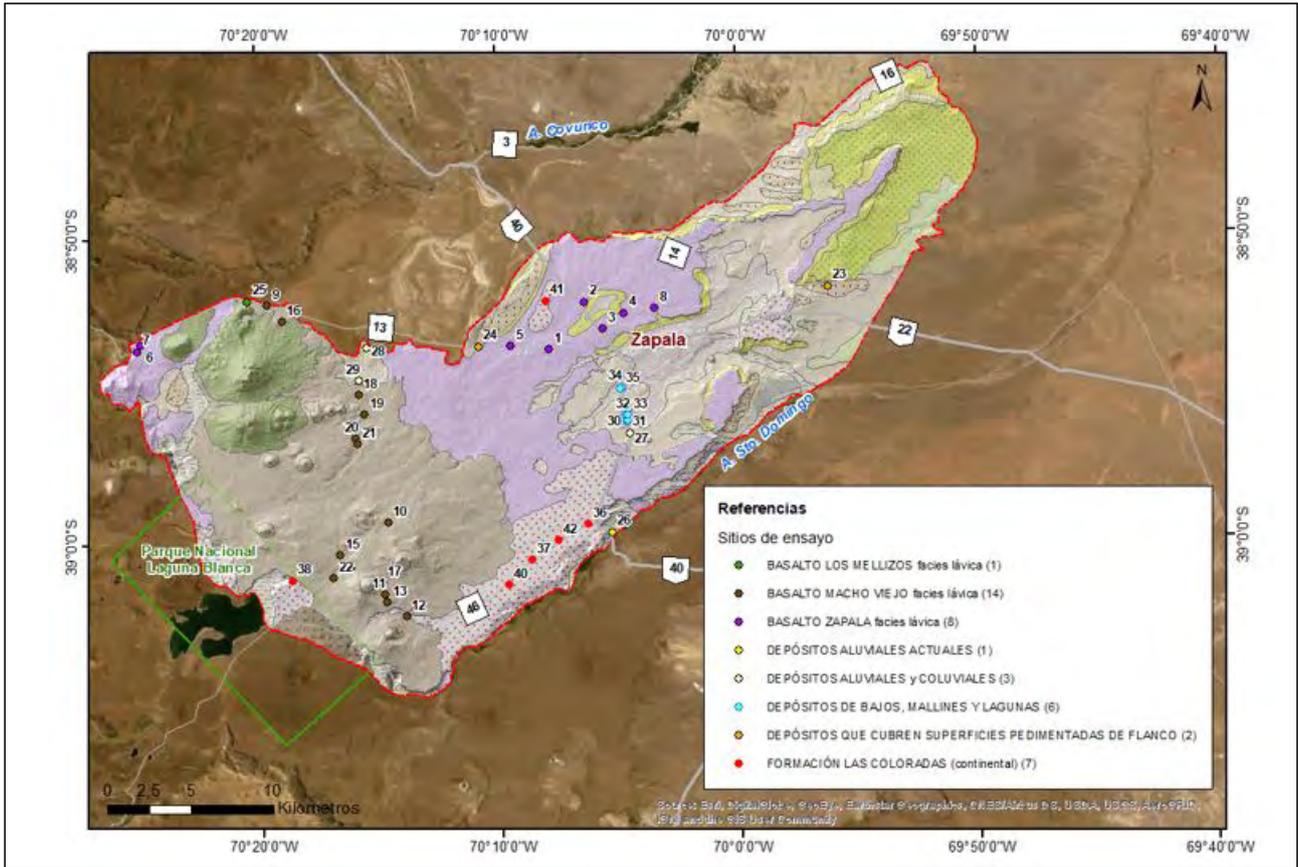


Figura 6. Ubicación de sitios de ensayo de infiltración y formaciones geológicas.

hm<sup>3</sup>/año para el área de 838 km<sup>2</sup>, y de 17 hm<sup>3</sup>/año para el área de 207 km<sup>2</sup>, considerando precipitaciones de 118 hm<sup>3</sup>/año y 27 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente. Esto representa un promedio de 63% de la precipitación anual para las dos áreas de consideradas.

Estudios realizados en el área (Tabla 7) por Carrica *et al.* (1997) y por Bonorino *et al.* (2002) consideraron sólo el área correspondiente al acuífero de alta productividad (207 km<sup>2</sup>). El índice geohidrológico aplicado por Gatica *et al.* (2018) fue realizado a escala regional, de manera que pudo extraerse los resultados para las dos áreas de interés.

El análisis comparativo de estos resultados mostró que la estimación de la recarga potencial se encuentra dentro del rango de valores de los estudios previos (Tabla 7) si bien la tasa de recarga potencial/precipitación es superior. De

acuerdo con Carrica *et al.* (1997) su estimación se minimiza los valores de recarga, por lo que su magnitud puede considerarse como un valor conservador probable.

La escala de análisis de Gatica *et al.* (2018) fue de 1:500.000, lo cual puede no representar adecuadamente variaciones zonales y locales de los factores considerados, por lo que un mayor detalle podría modificar sus resultados. Por otra parte, Gatica *et al.* (2018) utilizaron datos de precipitaciones mensuales estimados a partir de la base de datos LocClim (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2002) que presenta valores superiores a los utilizados por los otros autores. Teniendo en cuenta las relaciones entre recarga potencial y precipitación se observó que la metodología empleada por Gatica *et al.* (2018) arrojó la menor tasa, pero, debido a que parte de los registros de

Tabla 7. Comparación de estudios de recarga del acuífero Zapala.

Autor	Área (km <sup>2</sup> )	Precipitación (hm <sup>3</sup> /año)	Potencial Recarga (hm <sup>3</sup> /año)	Relación Potencial Recarga/precipitación
Carrica <i>et al.</i> (1997)	207	33	18	55%
Bonorino <i>et al.</i> (2002)	207	27	15	54%
Gatica <i>et al.</i> (2018)	207	51	20	39%
	838	215	82	38%
Este estudio	207	27	17	63%
	838	118	74	63%

precipitaciones superiores, presenta los mayores valores de recarga potencial.

Estas comparaciones ponen de manifiesto la importancia de contar con información climática robusta para estimar la recarga real de los acuíferos, además de la aptitud del territorio para la recarga.

### Consideraciones finales

El análisis geohidrológico respaldado por técnicas de geoprocésamiento mediante SIG mostró ser una herramienta muy útil en la evaluación del potencial de recarga de acuíferos. Resulta de gran valor en países en desarrollo, con baja infraestructura, accesibilidad y/o escasez de datos. Además, su aplicación resulta efectiva para ahorrar tiempo y costos, especialmente en áreas extensas, considerando las ventajas que ofrece la teledetección y su disponibilidad actual.

Los factores utilizados, sus interrelaciones y su ponderación, cumplen un rol clave en la estimación de la aptitud del territorio para la recarga. Esto hace necesario un amplio conocimiento del comportamiento de los factores. Dado que la recarga potencial de agua subterránea está directamente relacionada con la infiltración y percolación, los pesos asignados pueden ser más precisos y objetivos si la tasa de percolación y la conductividad hidráulica de cada factor de potencial de recarga se miden in situ o en laboratorio. Los ensayos de infiltración se presentaron como una alternativa eficiente al momento de ponderar los factores de litología, y usos y cobertura de suelo.

El ITH ha demostrado ser muy robusto al momento de identificar zonas de escurrimiento y susceptibilidad a la inundación. Este factor tiene especial importancia en valles aluviales áridos, donde la recarga ocurre usualmente en topografías deprimidas. En cuencas con densidades de drenaje moderadas a bajas, utilizar el factor densidad de drenaje podría introducir una subestimación en determinadas condiciones geohidrológicas que no favorecen el desarrollo de escurrimiento superficial permitiendo la infiltración y la recarga, aún en condiciones de precipitaciones escasas.

Incluir variables climáticas a partir de mediciones en distintos puntos de la cuenca, específicamente en el área de recarga, permitiría mejorar la incertidumbre en los balances hidrológicos. Esto surge debido a que el conocimiento regional de los factores climáticos es inferior al necesario requerido para realizar un estudio a la escala de análisis de este estudio (1:100.000). Además, los datos pluviométricos utilizados (periodo 1921-1950) se encuentran desactualizados. Debido a la descentralización y la falta de articulación

entre las instituciones, la actualización de la información resulta infructífera o incompleta. Actualmente se encuentran disponibles modelos climáticos basados en modelos físicos y análisis retrospectivo, como por ejemplo ERA5 y MERRA-2, de resolución espacial  $\sim 0.1$  y  $\sim 0.5$  grados respectivamente que resultan una buena alternativa para el análisis de ciclos y tendencias. Sin embargo, a través de un análisis preliminar realizado para este estudio se encontró que los modelos sobrestiman las precipitaciones debido a que aún no se encuentran suficientemente ajustados a nuestra región.

La identificación de potenciales zonas de recarga ayudará en la planificación de estrategias para la gestión eficaz de los recursos hídricos y la planificación ambiental del territorio. En ausencia de una validación rigurosa, la metodología propuesta puede usarse como primera estimación de las zonas favorables para la recarga. Por lo tanto, el IRP aplicado en este estudio es muy útil para quienes toman las decisiones y los administradores del agua. Puede ayudar a formular estrategias efectivas de explotación de aguas subterráneas para la sostenibilidad a largo plazo de este vital recurso.

### Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco de la Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y del proyecto de investigación Hidrogeología de la Provincia del Neuquén, de la Facultad de Ingeniería y la Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud de la Universidad Nacional del Comahue (004/1205).

### Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Rafael Adrian Maddio, Ana Cecilia Dufilho y Marcelo Luciano Gandini. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Rafael Adrian Maddio y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

### Declaración de conflicto de intereses

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

### Referencias Bibliográficas

- Arroyo, J. (1980). Relevamiento y priorización de áreas con posibilidades de riego. Provincia del Neuquén. (Vol. II). Consejo Federal de Inversiones.
- Avtar, R., Singh, C.K., Shastri, S., Singh, A. y Mukherjee, S. (2010). Identification and analysis of groundwater potential zones in Ken–Betwa river linking area using remote sensing and geographic information system. *Geocarto International*. 25(5), 379-396. <https://doi.org/10.1080/10106041003731318>

- Barbosa, P. y Weynants, M. (2018). Vulnerabilidad de las tierras secas a la desertificación, degradación de las tierras e impactos económicos y sociales. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.
- Bastianelli, N., Garrido, A., Albouy, R. y Carrica, J. (2016). El recurso hídrico subterráneo de la ciudad de Zapala, Neuquén: ambiente geológico de la formación la Bardita. En E. Custodio, M. Varni y R.F. García (Eds.), IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea (Catamarca) (pp. 134-141).
- Carrica, J.C., Delpino, D. y Bonorino G. (1997). Aspectos hidrogeológicos de los alrededores de la ciudad de Zapala, provincia del Neuquén. En Actas del I Congreso Nacional de Hidrogeología (Bahía Blanca) (pp. 165-182).
- Carson, M.A. y Kirkby, M.J. (1972). Hillslope form and processes (Cambridge Geographical Studies 3). Cambridge University Press, Oxford.
- Chow, V.T. (2000). Hidrología aplicada. McGraw-Hill.
- Delpino D., Giusiano A. y Deza M. (1994). Mapa geológico del departamento de Zapala. [Inédito]. Dirección Provincial de Minería de la Provincia del Neuquén.
- Dufilho, A.C., Toth, A. y Valle, D. (2002). Elaboración de bases para el ordenamiento territorial ambiental de la provincia del Neuquén. CFI-COPAIDE.
- Environmental Systems Research Institute. (2022). Acumulación de flujo (Spatial Analyst). ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/flow-accumulation.htm>
- Environmental Systems Research Institute. (2023). World Imagery Tile Layer [Imágenes]. [https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World\\_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x}](https://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/{z}/{y}/{x})
- Gaitán, J.J., López, C.R. y Bran, D.E. (2009a). Efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación en la estepa patagónica. *Ciencia del Suelo*, 27(2), 261-270.
- Gaitán, J.J., López, C., Ayesa, J., Siffredi, G. y Umaña, F. (2009b). Reconocimiento, cartografía y evaluación de mallines. Área Zapala, provincia del Neuquén. Centro Regional Patagonia Norte, Área de Investigación en Recursos Naturales, INTA EEA Bariloche.
- Gatica, J., Dufilho, A.C. e Irrisari, J. (2018). Estimación de la recarga potencial anual de acuíferos en la provincia de Neuquén. En R. García, E. Castro, M. Auge, C. Falcón y M. Blarasín (Eds.), *Hidrogeología Regional. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología (Salta)*. (Vol. I).
- Global Learning and Observations to Benefit the Environment. (2005). Investigación de cobertura terrestre/biología. GLOBE
- Herrick, J.E., Van Zee, J.W., Havstad, K.M., Burkett, L.M. y Whitford, W.G. (2017). *Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems*. (Vol. I). USDA -ARS Jornada Experimental Range.
- Instituto Geográfico Nacional. (2020). *Argentina y el mundo: Rasgos y componentes del territorio argentino*. ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina, Instituto Geográfico Nacional.
- Khodaei, K. y Nassery, H.R. (2011). Groundwater exploration using remote sensing and geographic information systems in a semi-arid area (Southwest of Urmieh Northwest of Iran). *Arabian Journal of Geoscience*, 6(4), 1229–1240. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0414-4>
- Leanza, H.A., Hugo, C.A., Herrero, J.C., Donnari, E. y Pucci, J.C. (1997). Picún Leufú. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina 1:250.000. Hoja Geológica 3969-III. Provincias de Neuquén y Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Leanza, H.A., Hugo, C., Repol, D., González, R., Danieli, J.C. y Lizuani, A. (2001). Hoja Geológica 3969-I, Zapala. Provincia del Neuquén. Boletín 275. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Macas-Espinosa, V.X. y López-Escobar, K.F. (2018). Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la demarcación hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. *Revista de Teledetección*, 51,135-145. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>
- Martínez de Azagra Paredes, A. y Navarro Hevia, J. (1996). *Hidrología forestal: el ciclo hidrológico*. Secretariado de Publicaciones, Universidad Valladolid.
- Matteucci, S.D. (2012). Ecorregión Estepa Patagónica. En J.H. Morello, S.D. Matteucci, A.F. Rodríguez y M.E. Silva (Eds.), *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos* (pp. 549-654). (1ª ed.). Orientación Gráfica Editora.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2002). LocClim, Estimador Local Mensual Climático.
- Pérez Pardo, O., Campomane, J., Cerruti, J., Cobello, H., Corso, M.L., Fernández Beyro, M., Freiler, S., Fruttero, Z., Maccagno, P., Machado, E., Morel, R., Rueda Avellaneda, O., Uccelli, A. y Viegas Auerlio, P. (2005). Manual sobre Desertificación. Dirección de Conservación del Suelo y Lucha contra la Desertificación, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación.
- Ramilo, E.J., Chehébar, C.E. y Mazzucchetti, S. (1993). Plan general de manejo Parque Nacional Laguna Blanca. Administración de Parques Nacionales.
- Reynolds, J.F., Stafford Smith, D.M., Lambin, E.F., Turner II, B.L., Mortimore, M., Batterbury, S.P.J., Downing, T.E., Dowlatabadi, H., Fernández, R.J., Herrick, J.E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F.T., Ayarza, M. y Walker, B. (2007). Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. *Science*, 316, 847-851. <https://doi.org/10.1126/science.1131634>
- Saaty, T. (1980). *Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process*. McGraw Hill.
- Soil Conservation Service. (1972). *National engineering handbook*. Section 4: Hydrology. U.S. Department of Agriculture.
- Smith, B. y Sandwell., D. (2003). Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. *Geophysical Research Letters*, 30(9), 20-23. <https://doi.org/10.1029/2002GL016643>
- Tumare, J., Jana, S.K. y Pal, D.K. (2014). Application of remote sensing and GIS for groundwater potential zone investigation in Bulolo-Wau surrounding Gold Mine, Morobe Province, Papua New Guinea. *International Journal of Geoinformatics*, 10(4), 45-57. <https://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/579>
- United States Geological Survey. (s./f.). EarthExplorer. Recuperado el 1 mayo 2016 de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wheater, H.S. 2007. Modelling hydrological processes in arid and semi-arid areas: An introduction to the workshop. En H. Wheater, S. Sorooshian y K. Sharma (Eds.), *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535734>
- Yeh, H.F., Lee, C.H., Hsu, C.K. y Chang, P.H. (2009). GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environmental Geology*, 58, 185-195. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1504-9>

# **Evidencia de actividad Holocena asociada a la falla La Esther. Piedemonte occidental de la sierra de Comechingones. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis, Argentina**

## **Evidence of Holocene activity associated with La Esther fault. Western piedmont of the Sierra de Comechingones. Sierras pampeanas de Córdoba and San Luis, Argentina**

 Guillermo Luis Sagripanti<sup>1\*</sup>   Daniel Héctor Origlia<sup>1</sup> 

\* Contacto

Recibido: 1 de abril de 2023 • Aceptado: 3 de julio de 2023 • Publicado: 1 de agosto de 2023

### **Resumen**

Las deformaciones neotectónicas en el borde activo de la Sierra de Comechingones están asociadas a fallas inversas que se ubican en su piedemonte, generando morfoestructuras discontinuas y paralelas a la falla principal que controla el levantamiento serrano. El objetivo de esta contribución es reportar evidencia de actividad holocena asociada a una falla de la zona frontal activa del piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. La metodología seguida fue la toma de fotografías aéreas oblicuas, el relevamiento geológico-estructural y la descripción de un perfil antrópico utilizando técnicas paleosismológicas. Los resultados indican que la falla La Esther es de movimiento inverso, con orientación N 350°-360° e inclinación al este, ha tenido actividad durante el Holoceno y es el flanco externo de un *piedmont foreland*. Se considera que esta falla tendría capacidad para generar fuertes terremotos.

**Palabras clave:** falla inversa, paleomagnitud, piedmont foreland, Sierra de Comechingones.

### **Abstract**

Neotectonic deformations in the active front of the Sierra de Comechingones are associated with reverse faults that are located in its western piedmont, generating discontinuous morphostructures parallel to the main fault that controls the mountain uplift. This contribution aims to report evidence of Holocene activity located in its neotectonic uplift front. The methodology followed entails obtaining oblique aerial photographs, a geological-structural survey, and the description of an anthropic profile using paleoseismological techniques. The results indicate that the La Esther fault is characterized by East-dipping of reverse movements with orientation N 350°-360° and has undergone activity during the Holocene, being the external flank of a *piedmont foreland*. It is considered that this fault would have the capacity to generate strong earthquakes.

**Keywords:** reverse fault, paleomagnitude, piedmont foreland, Sierra de Comechingones.

<sup>1</sup>Departamento de Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto.

## INTRODUCCIÓN

Las deformaciones neotectónicas más orientales en el segmento de subducción subhorizontal Pampeano se reconocen en las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis (Figura 1). La mayoría de éstas han sido relevadas en los frentes occidentales de levantamiento de las sierras de Comechingones y Sierra Chica, principalmente asociadas a sistemas de fallas que se caracterizan por presentar corrimientos del basamento paleozoico sobre depósitos cenozoicos asociados a fallas de movimiento inverso que inclinan al este y sudeste. En algunos casos, estos corrimientos generan morfologías formadas por una franja de cerrilladas bajas consideradas como *piedmont forelands* o *forebergs* (Costa *et al.* 2014; Costa 2019).

Los *piedmont forelands*, cerrilladas pedemontanas, se encuentran comprendidos entre la falla morfogénica principal donde se localiza la unión serranía piedemonte y la zona de deformación frontal activa. Los mismos están marginados por escarpas continuas o discontinuas con cara hacia la cuenca y el patrón distributivo del drenaje pedemontano se desarrolla en los sectores más distales del piedemonte, luego de haber superado las pendientes anómalas del relieve debido a la presencia de esta morfoestructura (Ikeda 1983; Bull 2008).

El Sistema de Fallas de Comechingones constituye el frente de levantamiento andino de la sierra homónima y presenta rasgos morfotectónicos asociados que son mayormente controlados por fallas inversas con inclinación al este (Figura 1b). La principal estructura de este sistema es la falla Comechingones considerada como responsable de la morfogénesis serrana principal. Otra estructura que forma parte de este sistema de fallas, si bien es de menor expresión topográfica posee mayor importancia neotectónica debido a su comprobada actividad en el cuaternario y a sus antecedentes paleosísmicos, es la falla El Molino (Costa *et al.* 1999, 2014, 2018).

Si bien las principales deformaciones neógenas-cuaternarias, que presentan las mejores expresiones, se encuentran en las escarpas marginales del frente occidental de la Sierra de Comechingones, también se han reconocido deformaciones cuaternarias en fallas inversas ubicadas en su piedemonte oriental (Sagripanti *et al.* 2018, 2022; Sagripanti y Villalba 2020). Las fallas con probada actividad cuaternaria detectadas en estos ámbitos serranos poseen antecedentes de fuertes paleoterremotos que se estima habrían alcanzado la magnitud (Richter) entre M 6,5 - 7,0 y se consideran que estos valores de magnitud podrían ser un umbral de energía de referencia para las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis (Sagripanti *et al.* 2009, 2014; Costa *et al.* 2001, 2014; Costa 2019; Sagripanti *et al.* 2018; Sagripanti y Villalba 2020; Castaldi *et al.* 2021a).

Es importante mencionar que algunas de estas estructuras que poseen potencial para generar fuertes terremotos se encuentran próximas al emplazamiento de numerosos e importantes centros turísticos y urbanos, centrales hi-

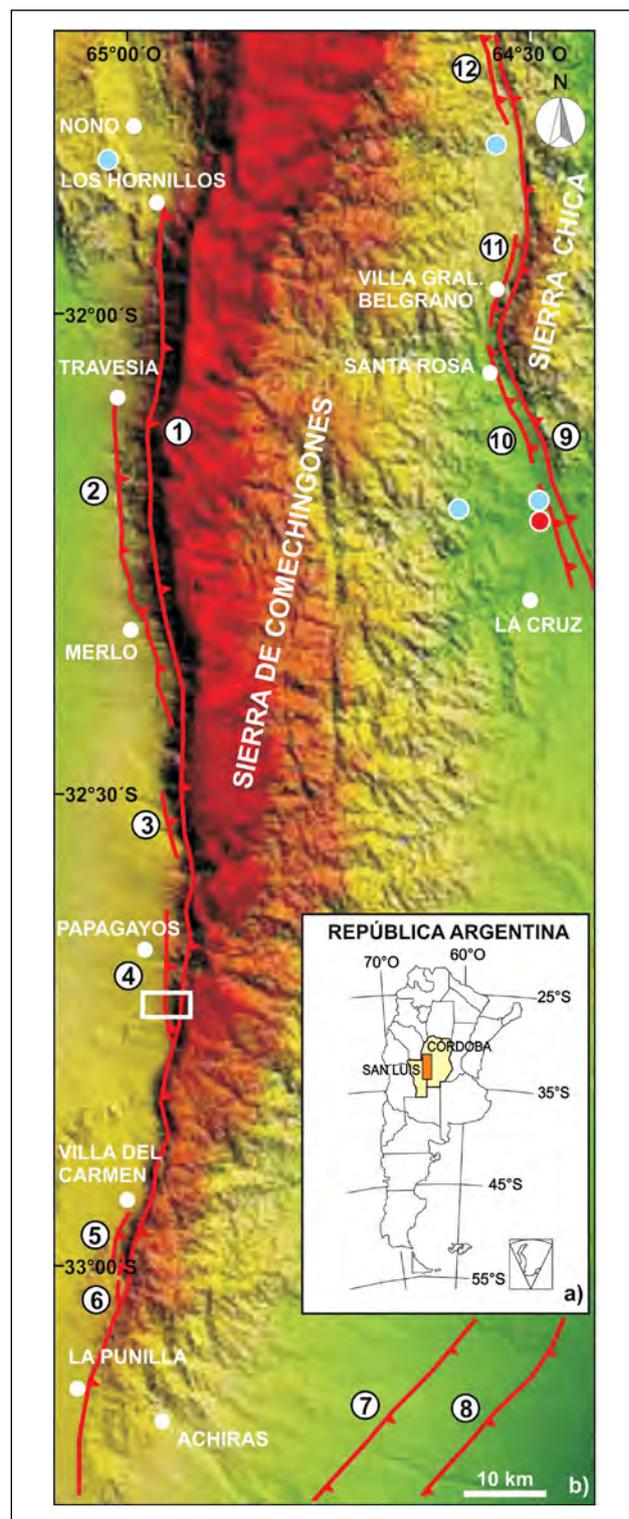


Figura 1. a) Mapa con la ubicación de la zona que comprende la Figura b. b) Mapa con las principales fallas. 1: Sistema de Fallas Comechingones, 2: El Molino, 3: Pisco Yaco, 4: La Esther, 5: La Aguada, 6: Villa del Carmen, 7: Las Lagunas, 8: Las Rosas, 9: Sistema de Fallas Sierra Chica, 10: Santa Rosa, 11: Villa G. Belgrano y 12: Potrero de Garay. El recuadro blanco indica la zona de estudio, los círculos blancos a las localidades, los círculos celestes a las centrales hidroeléctricas y el círculo rojo a la central nucleoelectrónica.

droeléctricas y una nucleoeléctrica, donde se desconoce el riesgo sísmico al que están expuestos (Figura 1b).

Aunque se ha avanzado en la detección y parametrización de algunas fallas sismogénicas ubicadas en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, sobre la base de la información que aportan las fotografías aéreas, imágenes satelitarias y perfiles naturales de campo, se han detectado evidencias, entre las localidades de Merlo y Villa del Carmen (San Luis), correspondientes a estructuras que no han sido reportadas y otras que han sido analizadas solo parcialmente. El objetivo de esta contribución es reportar evidencias de actividad holocena asociada a una falla ubicada en la zona frontal activa del piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. El área de estudio se ubica próxima a la localidad de Papagayos, 32° 43' 18" S y 65° 58' 28" O, región oriental de la provincia de San Luis (Figura 1).

Desde hace varios años se están investigando fallas de movimiento inverso, ubicadas en el ámbito del piedemonte de la Sierra de Comechingones, con el objetivo de conocer sobre la actividad cuaternaria y potencial sismogénico asociado, como la falla El Molino, La Aguada, Las Lagunas, entre otras (Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1998, 1999, 2001, 2018; Sagripanti *et al.* 2011, 2012, 2014, 2018, 2022; Villalba *et al.* 2017; Costa 2019; Sagripanti y Villalba 2020; Castaldi *et al.* 2021a; Sagripanti 2021). Por lo tanto, se considera que los resultados de esta contribución son una continuidad de las investigaciones mencionadas y un aporte para avanzar en el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de fallas.

## CONTEXTO NEOTECTÓNICO Y SISMICIDAD

El levantamiento y la deformación del basamento de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis, entre aproximadamente los 27° 30' y 33° 30' S durante el Mioceno-Plioceno y Cuaternario, están condicionados por la subducción subhorizontal de la placa tectónica de Nazca. El acortamiento cortical que produjo el levantamiento neotectónico y la configuración que adoptaron los bloques de las Sierras Pampeanas se vincula al inicio de la subducción de la dorsal Juan Fernández durante los últimos 7-10 Ma (Pilger 1981; Jordan *et al.* 1983; Jordan y Almendinger 1986; Smalley *et al.* 1993; Costa y Vita Finzi 1996; Ramos 1999; Ramos *et al.* 2002).

Este comportamiento de la placa de Nazca genera deformaciones como las correspondientes a los frentes de fallamiento cuaternario que se ubican principalmente en el ámbito del piedemonte occidental de las sierras de Comechingones y Sierra Chica, entre otras. Se considera que estas fallas marginales de los bloques serranos poseen una geometría lítrica que produce una asimetría topográfica que caracteriza a los bloques serranos, con un borde pasivo de ladera tendida al este y un borde activo en la ladera oeste de mayor pendiente, donde se concentra la mayor actividad neógena. Estas estructuras tienen asociadas fallas de bajo ángulo, como corrimientos del basamento cristalino paleo-

zoico (Devónico) sobre depósitos de sedimentos cuaternarios (Gordillo y Lencinas 1979; Jordan y Almendinger 1986; Massabie 1987; Costa 1999; Costa *et al.* 2014).

La expresión superficial de estos corrimientos es sutil y discontinua a lo largo del rumbo de las fallas, definiendo una serie de morfologías formadas por cerrilladas bajas y paralelas o subparalelas al frente de levantamiento principal, que se interpreta como una migración del frente de corrimiento hacia sectores occidentales medios y distales, hacia la cuenca, consideradas como *piedmont forelands* o *forebergs*. Estos rasgos morfotectónicos se ubican entre la falla morfogénica correspondiente al levantamiento principal de la sierra, posiblemente inactivo, donde se encuentra el quiebre topográfico de la unión entre el frente serrano y el piedemonte, y la zona de deformación frontal activa (Ikeda 1983; Costa *et al.* 1999; Costa 2019).

En particular, el desarrollo del *piedmont foreland* en la Sierra de Comechingones, asociado a la falla El Molino, origina un basculamiento de los depósitos aluviales con sentido contrario a la pendiente del piedemonte entre la falla morfogénica neógena y la falla que ejerce el levantamiento principal de la sierra; por lo tanto, el mismo adquiere un estilo estructural análogo al bloque serrano principal. La estructura que caracteriza esta morfoestructura tiene similar geometría y cinemática que la falla principal, y su trazo se curva y une, hacia el sur de Merlo, con las estructuras del frente serrano principal (Costa y Morla 1996; Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1999, 2018, 2019; Costa 2019).

El Sistema de Fallas de Comechingones posee su trazo principal localizado en la intersección de la ladera serrana con el piedemonte (Figura 1b) y sus expresiones morfotectónicas asociadas se reconocen a lo largo de 160 km, desde aproximadamente la latitud de la localidad de Los Hornillos al norte, provincia de Córdoba, hasta el sur de la localidad de La Punilla en la provincia de San Luis. Este sistema está formado por numerosas fallas inversas, de inclinación variable entre 40° E y 55° E que son controladas por anisotropías previas (Costa y Vita Finzi 1996; Murillo 1996; Costa *et al.* 1998, 1999, 2000, 2001, 2014, 2018).

Los rasgos morfotectónicos más sobresalientes que presenta este sistema de fallas son el trazo principal o falla Comechingones, considerada como responsable de la morfogénesis serrana y otras estructuras ubicadas en el piedemonte, donde se han detectado las evidencias neotectónicas más relevantes. Si bien se han reconocido deformaciones cuaternarias en distintos afloramientos, se considera que la exposición más representativa hasta el presente se ubica en proximidades de Merlo (Figura 1b) y corresponde a la falla El Molino (Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1998, 1999, 2001, 2014, 2018).

En la falla El Molino se reconoce una compleja estratigrafía asociada a la propagación de dos corrimientos con vergencias opuestas, el de vergencia occidental pone a rocas del basamento cristalino precámbrico sobre materiales detrítico-coluviales de pie de escarpa. Sobre la base de interpreta-

ciones realizadas, se ha propuesto un posible agrupamiento (*clustering*) de terremotos corticales con ruptura asociada, durante al menos los últimos 7 ka y estimado una tasa de acortamiento de 1 mm/año (Costa y Vita Finzi 1996; Costa *et al.* 1999, 2018; Costa 2019).

Entre las localidades de Merlo y La Punilla se encuentran fallas inversas con orientación meridional y buzamiento hacia el este, que al presente se conocen solo parcialmente las características y potencial sismogénico asociado a las mismas (Figura 1b), como por ejemplo la de Los Molles, que corresponde al extremo austral de la falla El Molino, Pisco Yaco, La Aguada, Villa del Carmen y La Esther (Morla y Costa 2004; Villalba *et al.* 2017; Sagripanti 2021; Castaldi *et al.* 2021a y b).

La interpretación de la ocurrencia de eventos paleosísmicos, fuertes, en las fallas El Molino y Las Lagunas, entre otras, ubicadas en el ámbito pedemontano de la Sierra de Comechingones se considera importante para esta región de intraplaca debido a que pone en evidencia la capacidad que poseen las fallas de este ámbito para generar terremotos fuertes. La paleomagnitud estimada para algunos de estos eventos, resultantes de un régimen tectónico de acortamiento neógeno-cuaternario, indica que habrían alcanzado una  $M$  6,5 - 7,0 (Sagripanti *et al.* 2011; Costa *et al.* 2018).

Estudios sobre sismicidad realizados por Alvarado *et al.* (2005) y Richardson *et al.* (2012) indican que la actividad sísmica de la región posee una distribución bimodal, distinguiéndose de interplaca y cortical, con hipocentros localizados entre 90 y 120 km, y en los 25 km más superficiales de la corteza, respectivamente, resultando la misma del régimen de subducción que caracteriza esta región.

La sismicidad en la zona de estudio, en el entorno a la latitud de la falla La Esther, posee registros instrumentales que indican que es cortical, leve y frecuente. Los sismos reportados (fuente INPRES) son normalmente de  $M \leq 3,0$  (Figura 2a) y la profundidad hipocentral de la mayoría de los últimos sismos es en promedio de 16 kilómetros (Figura 2b).

## CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO

El conocimiento de la cronoestratigrafía de los estratos asignados al Neógeno y Cuaternario de la región donde se ubica la zona de estudio es impreciso e insuficiente; debido a esto se definieron las unidades estratigráficas sobre la base de información obtenida de la descripción de niveles sedimentarios clásticos gruesos y finos expuestos, y se les asignó una cronología relativa a partir de una correlación con formaciones de similares características ya descritas para la región por Santa Cruz (1973, 1979), Gordillo y Lencinas (1979), Sato *et al.* (2003), Candiani *et al.* (2016) y Chiesa *et al.* (2011, 2019). Las unidades estratigráficas aflorantes en la zona de estudio se describen a continuación:

**Basamento cristalino:** La litología corresponde al complejo granítico cerro Áspero, plutón Uspara, que es un cuerpo alargado formado por un leucogranito de color rosa páli-

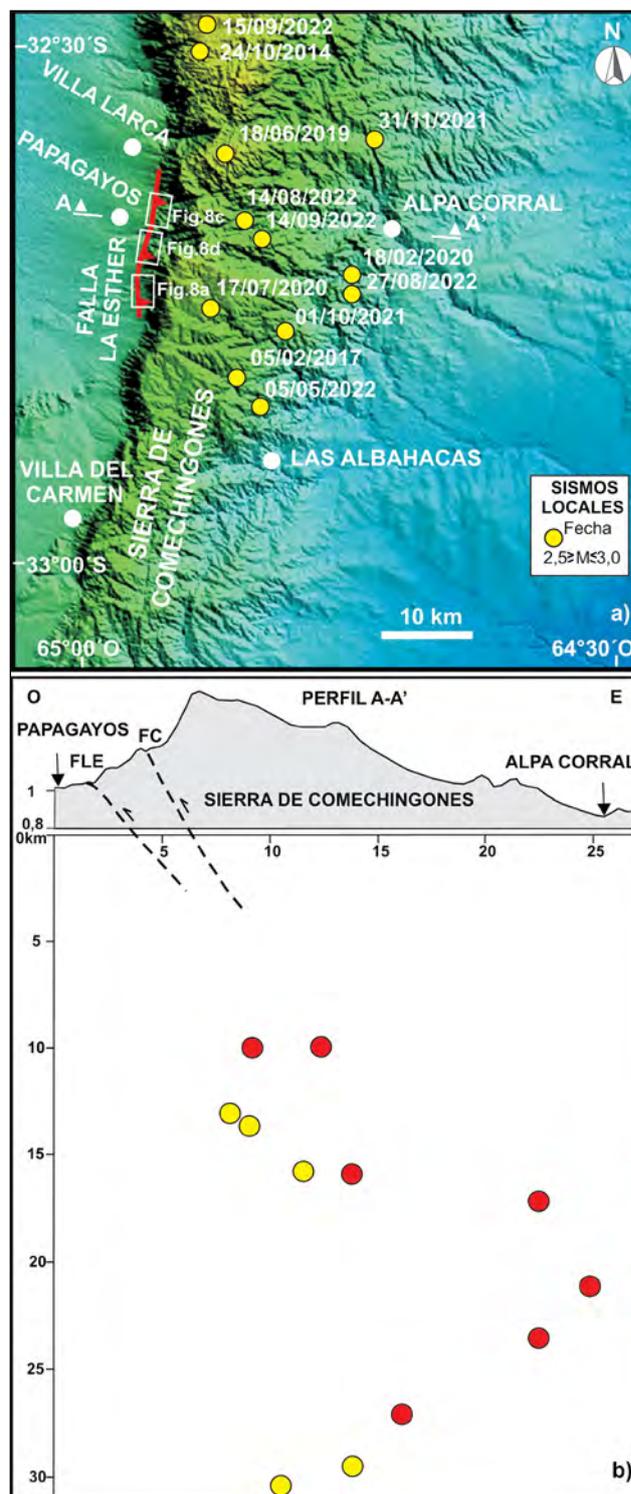


Figura 2. a) Mapa de epicentros de sismos locales en el entorno a la latitud de la falla La Esther. b) Perfil con la proyección en profundidad de las fallas La Esther (LE) y Comechingones (FC), y la distribución hipocentral de los registros sísmicos indicados en a). Los círculos en color rojo representan los registros más próximos a la falla en estudio, ubicados entre las latitudes aproximadas de los extremos a la traza de la misma.

do a gris que aflora de forma discontinua a lo largo de 12 km en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. En general, son granitoides que corresponden a la orogenia Achaliana en las Sierras Pampeanas, que se caracteriza por la intrusión de batolitos subcirculares a elípticos y cuerpos menores resultantes de una tectónica compresiva. Este sector se encuentra afectado por fallas que inclinan al este que han brechado y facilitado la alteración de la roca formando caolín, posiblemente illita y clorita. La edad de este es Devónico.

**Formación Papagayos (Formación Río Quinto):** Está compuesta por sedimentos rojizos, areniscas gruesas, conglomerados rojizos masivos con estratificación, margas y calcretes. Esta formación se presenta en forma de afloramientos aislados en el borde occidental de la Sierra de Comechingones entre Merlo y Villa del Carmen. En la zona próxima a la última localidad citada, yace en discordancia sobre el basamento cristalino y está constituida por areniscas conglomerádicas finas con abundante matriz limosa, color castaño rojizo claro, poco compacta. En los niveles conglomerádicos, la matriz se compone de arenas y los clastos son ígneos-metamórficos muy angulosos, de variables dimensiones, en algunos casos mayores a 0,20 m y en distintos sectores esta unidad se observa con una coloración rojiza. Se les asigna a estos depósitos un origen fluvial-aluvial y edad Mioceno tardío-Plioceno medio.

**Formación Uspara:** Está constituida por fanglomerados y cenoglomerados, que contienen arenas con selección y grado de consolidación diversa, y generalmente con cemento calcáreo. Son depósitos aluviales, con predominio de procesos de erosión hídrica mantiforme, reptación y remoción en masa del material coluvial y aluvio-eólico, y se encuentran presentes en el borde occidental de la Sierra de Comechingones. Su edad es Pleistoceno inferior a Pleistoceno medio.

**Conglomerado Merlo:** Está formado por gravas medias a gruesas, polimícticas, mal seleccionadas y muy friables, interestratificadas con niveles de arenas gruesas gravosas, de color castaño muy pálido. Los clastos de granitoides y metamorfitas presentan bordes angulosos a subangulosos. En algunos afloramientos del pie de la Sierra de Comechingones se reconoce a esta formación sobreyaciendo a la Formación Uspara, en contacto neto, erosivo. La edad de esta unidad es Pleistoceno superior.

**Depósito de Piedemonte:** Esta unidad se compone de materiales clásticos sueltos, donde es posible encontrar bloques de basamento de diferentes tamaños, hasta de 0,20 m, con una matriz de materiales más finos como arena, limo y arcilla. Es un depósito de abanico aluvial. Esta unidad es equivalente a la definida por Candiani *et al.* (2016) como Depósitos Pedemontanos y cuya edad es asignada como Holocena.

En la zona de corrimiento se reconocen materiales finos de origen cataclástico, arcillosos, de color pardo rojizo de aproximadamente 0,10 m de espesor.

## ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN NEOTECTÓNICA

### Metodología

La metodología seguida para la ubicación de sitios potenciales a relevar, correspondientes al frente de deformación activo, fue la realización de un vuelo a baja altura y la toma de fotografías aéreas oblicuas con bajo ángulo de incidencia solar, el relevamiento geológico-estructural de campo y la detección de perfiles naturales o antrópicos para su descripción.

Se realizó el relevamiento de un perfil antrópico ubicado perpendicularmente al trazo de la falla en estudio aplicando técnicas paleosismológicas, donde se describieron las unidades estratigráficas, se delimitaron sus contactos y se relevaron las deformaciones expuestas. Además, se aplicaron fórmulas empíricas para estimar la paleomagnitud asociada a la falla.

### Características de la falla La Esther

La falla denominada La Esther es de movimiento inverso con una orientación que varía entre N 350°-360° e inclinación entre 37° y 55° E. El trazo es sub-paralelo a la falla de Comechingones y en su extremo sur se curva hacia esta estructura principal (Figuras 1 y 3).

La expresión superficial que presenta es una morfología sutil definida por una serie de cerrilladas bajas, discontinuas, con escarpa de cara al oeste, hacia la cuenca, y sub-paralelas al frente de levantamiento principal.

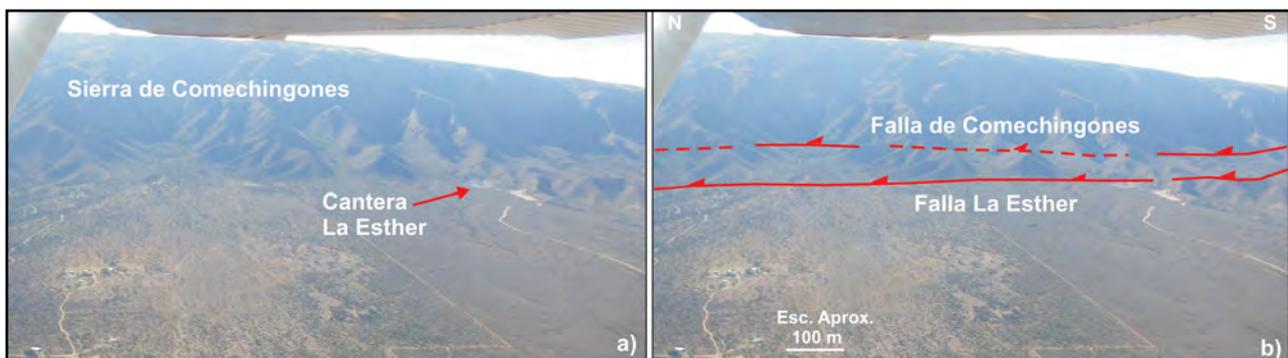


Figura 3. a) Fotografía oblicua tomada en dirección sureste donde se ubica la cantera La Esther. b) Dibujo sobre la fotografía donde se indica el trazo de la falla La Esther.



Figura 4. a) Fotografía aérea oblicua tomada en dirección este donde se presenta una vista de la cantera La Esther y el trazo de la falla La Esther. b) Dibujo sobre la fotografía oblicua, de mayor detalle, donde se indica falla La Esther y con recuadros blancos la ubicación de las Figuras 5 y 6

### Perfil Exposición de la Falla

Es un perfil antrópico que se encuentra en una cantera denominada La Esther ( $32^{\circ} 43' 18''$  S y  $65^{\circ} 58' 28''$  O), donde se realiza la explotación de caolín entre otros minerales y se ubica a aproximadamente 5 km al sur de la localidad de Papagayos (Figuras 1, 4 y 5). El perfil tiene una orientación N  $145^{\circ}$  con frente al suroeste, su longitud es de 7 m y posee 3 m de altura (Figura 6).

Las unidades presentes en el perfil se describen a continuación.

**Unidad A:** Litología que corresponde a un granitoide con un alto grado de alteración. De acuerdo con la altura que tiene el frente de explotación de la cantera, su espesor sería de al menos 20 m. En el sector que está en contacto con las unidades B, C, D y E (Figura 6) se encuentra cubierto por material suelto mezclado (arenas y arcillas) producto de la remoción mecánica generada por la labor de la cantera. Esta unidad se correlaciona con el basamento cristalino descrito en la estratigrafía.

**Unidad B:** Es un nivel, pardo rojizo, compuesto por clastos líticos angulosos cementados, de tamaño entre 0,1 y 0,2 m, que tienen una disposición caótica y provienen en su mayoría de granitoides. Se interpreta como un conglomerado con matriz areno limosa. Este depósito correspondería a un

abanico aluvial asociado al frente serrano. Su espesor es de al menos 1,4 m y posiblemente esta unidad, que se correlaciona con la Formación Papagayos, está de forma discordante sobre la unidad A.

**Unidad C:** Está compuesta por clastos líticos ígneos y metamórficos con matriz areno arcillosa. En el perfil Exposición de la Falla, entre los 0 m y 5,5 m, este depósito de aspecto fanglomerádico en contacto con la unidad A presenta una distribución caótica de los materiales y se reconocen clastos líticos angulosos que definen una laminación grosera. Se interpreta como un depósito de abanico del pie de la sierra que posee un espesor de al menos 1,2 m y se correlaciona con la Formación Uspara.

**Unidad D:** Está formada por clastos líticos angulosos tamaño gravas media a gruesa de origen ígneo-metamórfico, matriz soportada, limo-arcillosa. Su espesor es de al menos 0,7 m, se considera que corresponde a un depósito de abanico aluvial y se correlaciona con el Conglomerado Merlo.

**Unidad E:** Formada por clastos líticos, ígneos-metamórficos, angulosos, de tamaño grava con matriz sostén areno arcillosa y presenta una laminación poco visible. Se considera que corresponde a un depósito de abanico aluvial. Su espesor es variable entre 0,4 y 1 m. Se correlaciona con el Depósito de Piedemonte, holoceno, definido por Candiani et al. (2016).

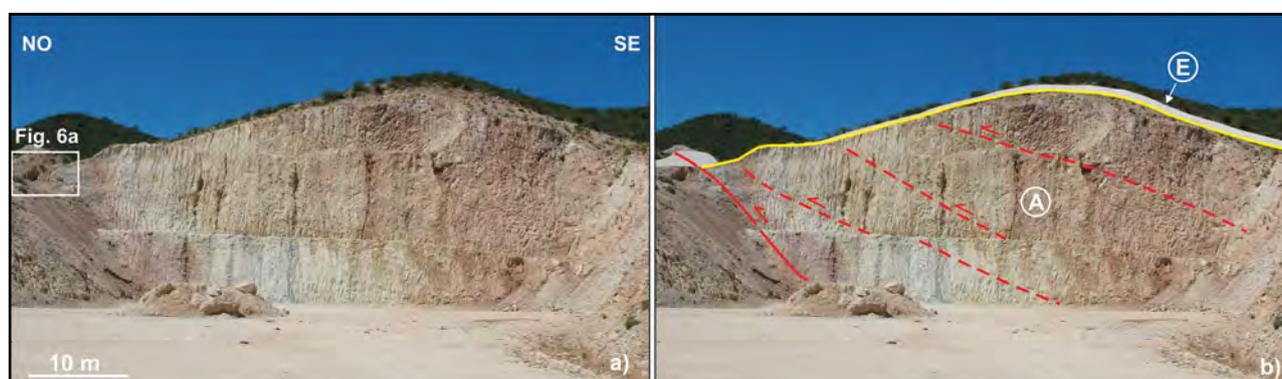
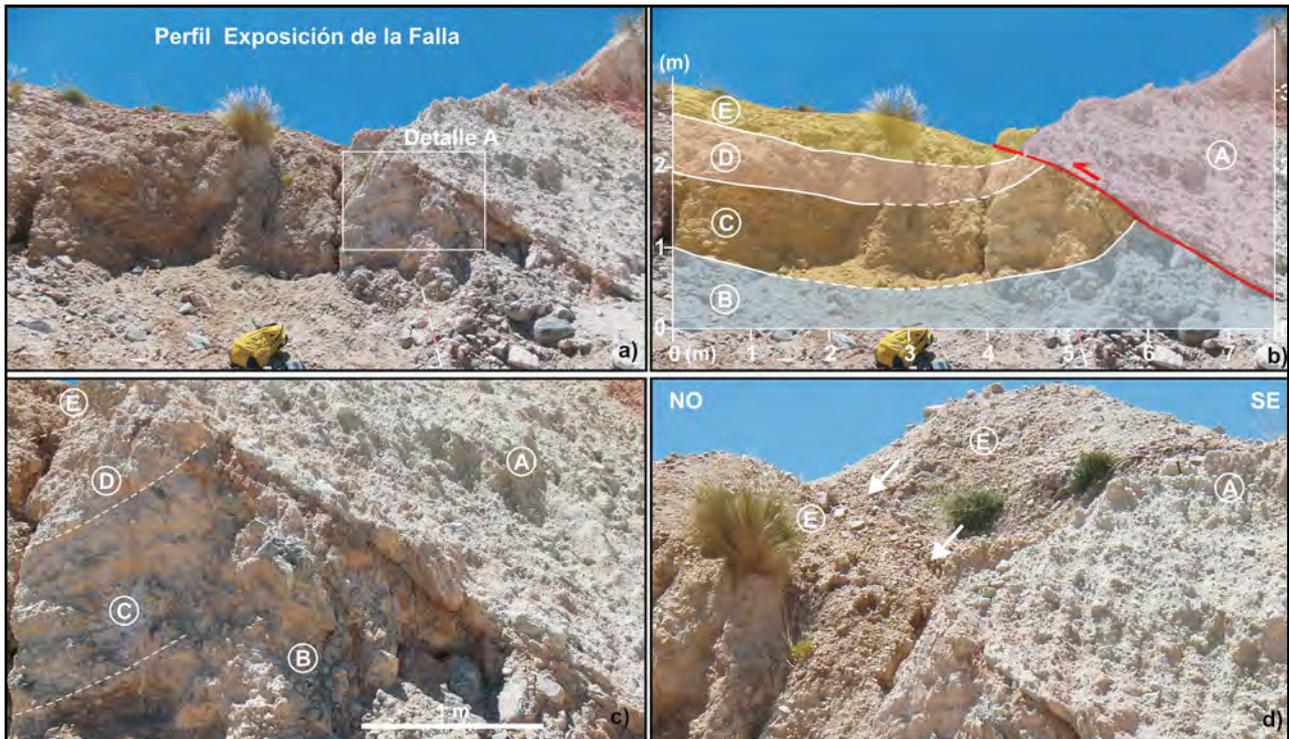


Figura 5. a) Vista panorámica en dirección norte de la cantera La Esther. b) Dibujo sobre la fotografía donde se indica la ubicación de los planos de fallas con línea roja y los planos inferidos en línea roja de trazos, la topografía del techo de la unidad A con línea de color amarillo y los sedimentos detríticos de depósitos modernos, Unidad E, en color gris.



**Figura 6.** a) Vista en dirección norte del perfil Exposición de la Falla. b) Dibujo sobre la fotografía del perfil con las unidades definidas y los contactos, indicados con línea blanca continua y los contactos inferidos con línea de trazos blanca. La falla principal está indicada con línea de color rojo. c) Detalle A. d) Vista de la falla propagando en los sedimentos holocenos, indicado con flechas blancas.

Las deformaciones que se han relevado se encuentran principalmente en la unidad A, que corresponde al bloque del techo de la falla. En esta unidad, donde la deformación y grado de alteración mecánica varían a lo largo del perfil (Figura 5), se reconocen varios planos de discontinuidad que pertenecen a la zona de deformación de la falla; el más importante, que corresponde a la falla La Esther, se ubica en el extremo noroeste del perfil y es un plano de falla de movimiento inverso con orientación N 350° e inclinación que varía entre 37° E en la parte superior a 47° y 55° E en la parte inferior. Los planos de fallas restantes, inferidos, poseen una orientación de N 350° e inclinaciones entre 30° y 20° E (Figura 5b).

Entre los 4 m y 7,5 m horizontales del perfil se reconoce que la unidad A sobrecorre a las unidades B, C y D (Figura 6b) que corresponden al bloque del piso de la falla. Además, el plano de falla que ha propiciado el corrimiento del basamento sobre los depósitos sedimentarios también ha afectado a los depósitos, detríticos de la unidad E (Figuras 5 y 6).

Los contactos de las unidades sedimentarias ubicadas en el bloque del piso de la falla, principalmente de la unidad C, presentan una curvatura cóncava hacia arriba entre los 0 m y 6 m horizontales, definiendo la geometría de un sinclinal que posee la traza axial con una orientación aproximadamente paralela al rumbo de la falla principal (Figura 6b). Esta deformación que presentan las unidades correspondería a un sinclinal por arrastre debido al empuje horizontal y vertical generado por el corrimiento del techo de la falla sobre las

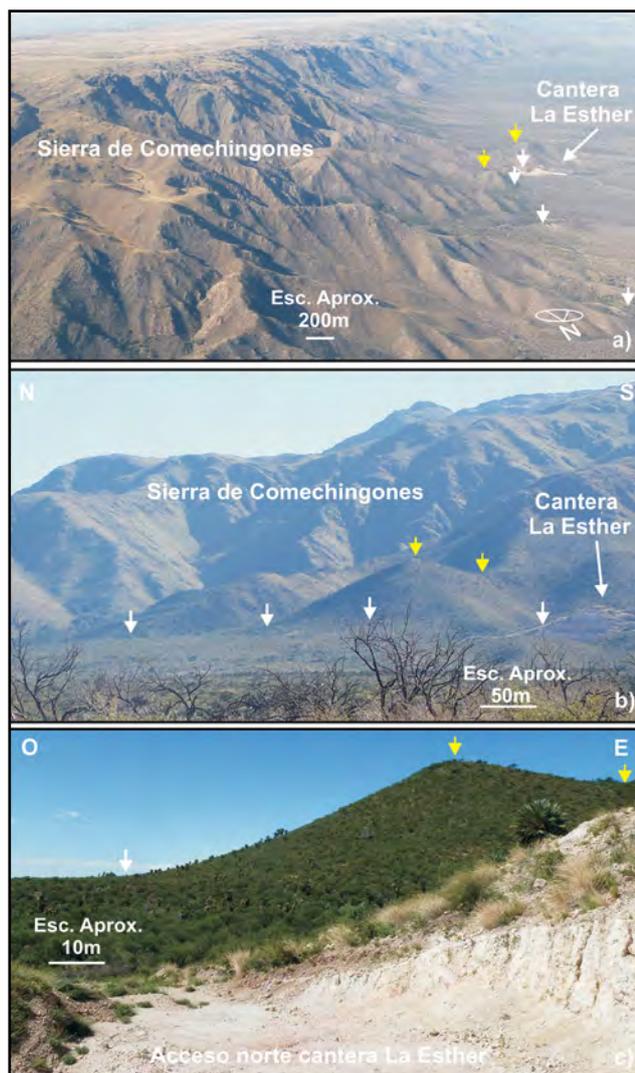
unidades sedimentarias clásticas correspondientes al piso de la falla.

En el techo de la unidad A se reconoce una geometría que define una curvatura antiformal, con la orientación de la traza axial aproximadamente paralela al rumbo de la falla principal. El techo de esta unidad se encuentra coronado por los sedimentos clásticos de la unidad E, que poseen su mayor espesor en el sector este-sureste del perfil e inclinan hacia el este (Figura 5b).

La expresión morfológica superficial que genera esta estructura es sutil; son cerrilladas de escasa altura que poseen una asimetría topográfica similar a los principales bloques serranos, con una ladera que inclina al oeste de mayor pendiente, entre 12° y 14°, con escarpa de cara a la cuenca, hacia el oeste del piedemonte, donde se reconocen las evidencias de deformaciones correspondientes al frente activo (Figuras 4, 5 y 7) mientras que la otra ladera inclina alrededor de 3° al este con baja pendiente. Estas morfoestructuras disminuyen su altura tanto hacia el sur como hacia el norte, lo que dificulta la detección de la deformación en superficie. Esta variación en la altura posiblemente está vinculada a que el desplazamiento de la falla disminuya hacia los extremos de la traza.

## ESTIMACIÓN DE LA PALEOMAGNITUD

En los estudios tendientes a valorar el peligro sísmico asociado a fallas sismogénicas, uno de los principales pará-



**Figura 7. a) Vista oblicua en dirección sur donde se presenta la cantera y la falla La Esther. b) Vista panorámica hacia el este donde se muestra la cantera, el cerro de la Figura c) y la falla La Esther. c) Vista hacia el norte de un cerro próximo a la cantera que posee una ladera con pendiente hacia el este. En las figuras, la ubicación de la falla La Esther se ha indicado con flechas blancas y la inclinación hacia el este de las cerrilladas con flechas amarillas.**

metros a determinar es la magnitud. La energía liberada por un fuerte terremoto puede ser representada también por medio de la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ). La ventaja que ofrece esta determinación sobre otras formas de medición de la magnitud (amplitud de las ondas sísmicas) es que relaciona directamente el tamaño del terremoto y la longitud de la fuente, que son medidas en el campo (Reiter, 1988). Normalmente en estudios sobre el peligro sísmico son aplicadas relaciones empíricas para determinar la magnitud, algunas de estas relaciones indican una proporción lineal entre la longitud de ruptura de la falla y el tamaño del terremoto (de Polo y Slemmons, 1990).

Si bien son numerosas las evidencias primarias usadas para inferir la magnitud de un paleoterremoto, la longitud de

ruptura de la superficie y el desplazamiento máximo son los parámetros más comunes. La estimación de la primera de éstas es la que se realiza con un cierto grado de incertidumbre, partiendo de que es difícil corroborar que la escarpa generada, que es la evidencia actual, se haya formado por la ocurrencia de un único paleoterremoto. Esta situación puede incidir en la subestimación o sobrestimación de la longitud de ruptura superficial (Bonilla *et al.* 1984; Wells y Coppersmith 1994; McCalpin 2009).

En la estimación de paleomagnitud se usan modelos simples que se basan en datos medidos y modelos más complejos que se basan en datos inferidos por métodos indirectos, presentando estos modelos un cierto grado de incertidumbre, generado por la deficiencia en la longitud aportada por los datos históricos y la dificultad para medir con precisión la longitud de ruptura prehistórica. Por lo tanto, hay errores que pueden conducir a una sobre o sub estimación de la longitud de ruptura. Por ejemplo, si la traza de la superficie de ruptura es discontinua esto puede ser generado por erosión o estar sepultada por sedimentos más modernos, cuando probablemente la escarpa tiene mayor longitud y se encuentra obliterada (McCalpin 2009).

Se consideran como fuentes de incertidumbre a: los extremos de la traza no han sido determinados y examinados adecuadamente; los extremos de la traza pueden estar sepultados por sedimentos más modernos o vegetación que ocultan la ruptura; el desplazamiento de la falla disminuye o se extingue gradualmente hacia los extremos de la traza, resultando en algunos casos indefinidos; la disminución local del desplazamiento a lo largo de la falla está incorrectamente interpretada; dificultad para distinguir entre la falla principal y secundarias, e inclusión o exclusión de irregularidades en la geometría de la falla (McCalpin 2009).

La certidumbre en la estimación de una ruptura dependerá de la cantidad de desplazamiento original de la falla, del tiempo transcurrido pos evento, de los procesos geomorfológicos, topografía, clima y resistencia de los materiales a la erosión. Por ejemplo, en escarpas desarrolladas en materiales no cohesivos, estas se pueden obliterar más rápido, favoreciendo la subestimación la longitud de ruptura original (McCalpin 2009).

La longitud de ruptura superficial unitaria asumida en este estudio, para la falla La Esther, introduce importantes fuentes de incertidumbre. Por ejemplo, los extremos de la traza no se determinaron de forma precisa en campo debido a que los sitios para constatar su presencia son muy escasos, en algunos lugares inaccesibles por vegetación y en otros por estar sepultados con los sedimentos más modernos. No obstante, la longitud de la traza se ha determinado por medio de la distancia de una línea recta que une los extremos asumidos de la misma.

Para disminuir el grado de incertidumbre considerado, además de los relevamientos y revisiones de campo de algunos sitios ubicados sobre la traza de la falla, se recurrió al apoyo de la técnica de la toma de fotos aéreas a baja al-

tura, oblicuas y con bajo ángulo de incidencia solar. En la fotointerpretación se definió como base de referencia para delimitar la traza, a la evidencia de ruptura de la falla más reciente que genera una expresión morfológica superficial y que se encuentra asociada al perfil descripto que, si bien es sutil, es distintiva para el sector de estudio. Esto ha permitido reconocer y delimitar el rasgo rectilíneo superficial que genera esta traza formada por tramos algo discontinuos. Se asume que este rasgo morfológico superficial es generado por la ruptura del plano de falla que afecta a los sedimentos modernos, de edad holocena, definidos por Candiani *et al.* (2016). Si bien la traza es discontinua, se puede identificar a lo largo de, al menos, 14 kilómetros con una orientación paralela o subparalela a la traza de la falla principal, responsable del levantamiento serrano.

Con el fin de conocer de forma preliminar el tamaño de un paleoterremoto asociado a la falla La Esther se realizó una aproximación determinística utilizando formulas empíricas propuestas por distintos autores como Wyss (1979), Bonilla *et al.* (1984), Wells y Coppersmith (1994) y Somerville (2006), que permiten escalar el tamaño de un terremoto, determinando la magnitud superficial ( $M_s$ ) y la magnitud del momento sísmico ( $M_w$ ).

Los parámetros que fueron considerados en cálculo son la longitud del trazo de la falla, que se asume como la posible longitud de ruptura holocena, que es de 14 km, y la profundidad hipocentral de 16 km, que resulta del promedio de los últimos sismos registrados a la latitud de la falla La Esther.

Wyss (1979):

$$M_s = A + 4,15 \quad (1)$$

Donde A es igual al logaritmo de la superficie de la falla en  $\text{km}^2$ .

Bonilla *et al.* (1984):

$$M_s = 6,04 + 0,704 \text{ Log } L \quad (2)$$

Donde L es la longitud de ruptura de la falla en kilómetros.

Wells y Coppersmith (1994):

$$M_w = 3,98 + 1,02 \text{ Log } L \quad (3)$$

y Somerville (2006):

$$M_w = 3,78 + 1,05 \text{ Log } L \quad (4)$$

En (3) y (4) donde L es la superficie de ruptura de la falla en  $\text{km}^2$ .

Los valores obtenidos son: (1)  $M_s = 6,7$ ; (2)  $M_s = 6,5$ ; (3)  $M_w = 6,3$  y (4)  $M_w = 6,2$ .

## RESULTADOS

Las deformaciones relevadas resultan de un corrimiento causado por una falla de movimiento inverso, con vergencia hacia el oeste, que posiciona el basamento granítico, Devónico, sobre una secuencia de depósitos de materiales detríticos coluviales de pie de escarpa de edad Neógeno-Cuaternario.

Se determinaron los siguientes parámetros de la falla La Esther en el perfil Exposición de la Falla: la orientación del plano de falla principal es  $N 350^\circ$  y su inclinación de  $37^\circ$  E y aumenta hacia la parte inferior del perfil, hasta alcanzar  $55^\circ$  E; la orientación de los planos de fallas secundarias es  $N 350^\circ$  con inclinaciones entre  $30^\circ$  y  $20^\circ$  E (Figuras 5 y 6), el desplazamiento de inclinación es de al menos 4,3 m entre las unidades A y B (Figura 6b) y el rechazo vertical expuesto es de al menos 2,6 m de la unidad A (Figura 6b).

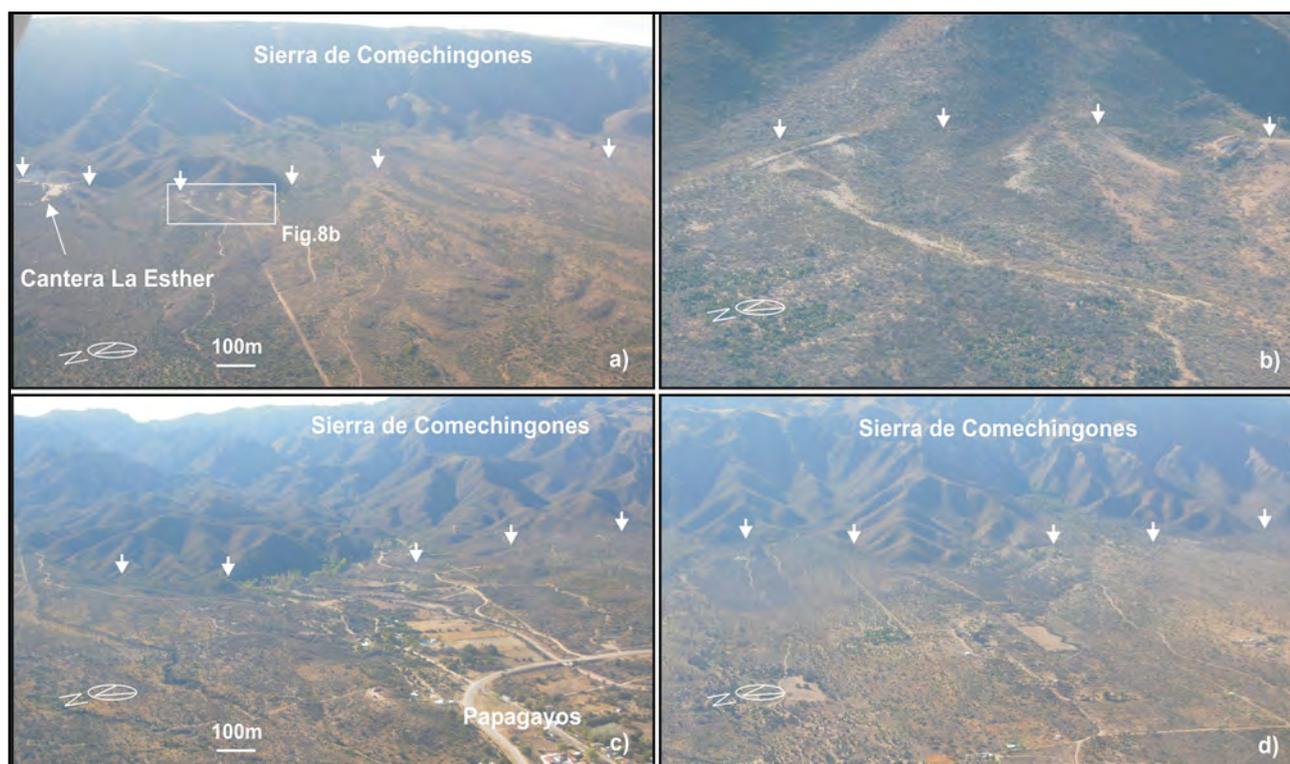
La morfología superficial que genera esta estructura en algunos sectores presenta un flanco con una escarpa al oeste del piedemonte, hacia el centro de la cuenca, con inclinación entre  $12^\circ$  y  $14^\circ$ , de hasta 10 m de altura y el otro flanco, coronado por la unidad E, con una inclinación de  $3^\circ$  hacia el este, lo que permite interpretar que la falla La Esther sería el borde activo de una morfoestructura, *piedmont foreland*, desarrollado en la zona de estudio.

La falla presenta una expresión sutil de difícil detección debido posiblemente a la conjunción de varios factores, como lo son el bajo rechazo vertical, la disminución del buzamiento hacia la superficie (Figuras 5 y 6), la obliteración por los depósitos detríticos fluviales y por la densa vegetación nativa del ámbito serrano (Figura 7c). Sin embargo, se ha logrado reconocer la expresión superficial del trazo de la falla en fotografías oblicuas, tomadas a baja altura y con bajo ángulo de incidencia solar, desde el sur de la cantera La Esther hasta el norte de la localidad de Papagayos (Figura 8). Estos rasgos superficiales, si bien son sutiles, han permitido determinar que la longitud del trazo de la falla es de al menos 14 kilómetros.

Si bien, la longitud de ruptura superficial unitaria considerada para la falla es uno de los parámetros que introduce la mayor incertidumbre en la estimación de la paleomagnitud, los resultados obtenidos de las relaciones empíricas aplicadas para calcular la  $M_s$  y  $M_w$  son entre 6,2 y 6,7. Siendo los mismos similares a los obtenidos para otras fallas con actividad cuaternaria comprobada correspondientes al Sistema de Fallas Comechingones. Por lo tanto, estos valores permiten tener una aproximación sobre el potencial de la falla en estudio.

## DISCUSIÓN

a) Una característica morfoestructural de la mayoría de las Sierras Pampeanas es que los bloques principales presentan una ladera tendida con baja pendiente (borde pasivo) y una corta, abrupta (borde activo), donde se concentra el fallamiento neógeno. En el ámbito pedemontano de alguno de estos bloques se han relevado cerrilladas limitadas por



**Figura 8.** a) Vista oblicua del sector de la cantera La Esther con la continuidad del trazo de la falla homónima hacia el sur. b) Vista oblicua ampliada de un sector de la Figura a). c) Vista oblicua con el trazo de la falla próxima a la localidad de Papagayos. d) Vista oblicua con el trazo de la falla en un sector entre la cantera y la localidad de Papagayos. En las figuras el trazo de la falla La Esther se ha indicado con flechas blancas. La ubicación de las figuras a), c) y d) se indican en la Figura 2a.

fallamiento cuaternario en su flanco externo. El desarrollo de estas cerrilladas o *piedmont foreland* genera un basculamiento de las superficies aluviales en sentido opuesto a la pendiente pedemontana en consonancia con el estilo estructural del bloque serrano principal (Costa 2019).

La presencia de lomas correspondientes a niveles aluviales, alineadas al frente serrano principal y basculadas hacia el este, que presentan en su extremo occidental una escarpa de cara hacia el oeste del piedemonte, donde se ubica el centro de la cuenca, se considera que corresponde a un *piedmont foreland* asociado a la falla La Aguada (Figura 1b), ubicada al sur de la falla La Esther (Castaldi *et al.* 2021b).

Las evidencias relevadas, características de un ambiente compresivo, correspondientes a la falla La Esther, tanto el corrimiento del basamento sobre depósitos detríticos como la morfología superficial desarrollada y el basculamiento hacia el este de depósitos detríticos holocenos, poseen correspondencia con los antecedentes mencionados. Por lo tanto, se interpreta que la falla en estudio corresponde al flanco externo de un *piedmont foreland* que se ubica en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, próximo a la localidad de Papagayos y que estas evidencias de movimientos recientes están indicando la migración del frente activo hacia el oeste del piedemonte, donde se ubica la cuenca.

**b)** Estudios realizados en las fallas El Molino y La Aguada (Figura 1b) indican que las mismas poseen potencial para

producir fuertes terremotos. En el caso de la primera, se ha determinado un posible agrupamiento de terremotos corticales para los últimos 7 ka. Estos eventos sísmicos han sido con ruptura superficial asociada, evidenciando la ocurrencia de fuertes paleoterremotos (Costa *et al.* 2018). Por otra parte, los estudios realizados en la falla La Aguada indican a partir de las evidencias de deformaciones relevadas que, la misma tendría potencial para generar eventos sísmicos fuertes que podrían alcanzar el umbral de energía suficiente para generar ruptura en superficie (Castaldi *et al.* 2021b).

La similitud que tienen algunas características de la falla en estudio con las nombradas anteriormente como, que es una falla de movimiento inverso que inclina al este, ubicada en el borde externo de un *piedmont foreland* y que posee evidencias de movimientos cuaternarios, junto a los valores paleomagnitud obtenidos, permiten considerar que la falla La Esther también podría tener potencial para generar fuertes terremotos.

**c)** En el Sistema de Fallas Sierra Chica de Córdoba se ha logrado documentar la migración del frente de corrimiento neotectónico y se reconoce que no presenta morfologías de fallamiento diagnósticas asociadas. En los valles de Los Rarres y Calamuchita se ha reconocido un frente de fallamiento cuaternario externo al frente serrano, y la zona correspondiente a la deformación frontal activa asociada presenta lomas sin escarpas notorias u otro tipo de morfología diag-

nóstica de fallamiento (Sagripanti *et al.* 2014; Costa *et al.* 2021). Estas lomadas, formadas por rocas del basamento cristalino, están coronadas por una delgada capa de depósitos detríticos cuaternarios. Las rocas corresponden al bloque elevado de la falla y, en proximidades de los planos de corrimiento cuaternarios, presentan una importante desagregación mecánica, con un ángulo de fallamiento menor a 45° E en la zona de deformación frontal activa (Costa 2019).

La falla La Esther en general no presenta morfologías de fallamiento que indiquen su presencia; solo en algunos tramos de su trazo se pueden reconocer cerrilladas de baja altura, con una ladera tendida que inclina al este, como también sutiles deformaciones superficiales detectadas en las fotografías tomadas a baja altura. Las evidencias morfológicas superficiales que genera esta estructura, junto al hecho que la roca del basamento cristalino correspondiente al bloque elevado de la falla, en proximidades de los planos de corrimiento tiene desagregación mecánica y que está coronada por un depósito detrítico holoceno inclinado hacia el este, presentan similitud con las descritas anteriormente para el Sistema de Fallas Sierra Chica. Por lo tanto, se interpreta que las evidencias de deformaciones y morfologías relevadas corresponden a un sector de deformación frontal activa presente en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones.

**d)** Las fallas inversas El Molino, Pisco Yaco, La Aguada, entre otras, se considera que forman parte del Sistema de Fallas Comechingones. Estas estructuras han tenido actividad durante el neógeno-cuaternario, se ubican en el flanco externo del *piedmont foreland* correspondiente al frente activo de deformación (Costa *et al.* 2018; Castaldi *et al.* 2021b), tienen una orientación paralela a la falla principal responsable del levantamiento serrano, inclinan al este y en su extremo sur se curvan hacia la falla principal. La ubicación de la falla La Esther en el flanco externo del *piedmont foreland*, piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, su orientación e inclinación, las deformaciones en sedimentos neógenos-cuaternarios que posee, la curvatura de su extremo sur hacia la falla principal, indicando que esta estructura se podría unir con la misma o bien que continúa como no emergente, se suponen características similares a las reportadas en las fallas citadas anteriormente. Por lo tanto, se considera que esta falla también formaría parte del sistema de fallas mencionado.

## CONCLUSIONES

**a)** Se concluye que tanto las deformaciones relevadas que corresponden a un corrimiento del basamento, Devónico, sobre sedimentos no consolidados de edad Neógeno-Cuaternario, como la presencia de depósitos detríticos holocenos que inclinan hacia el este son evidencias de la actividad, al menos, holocena de la falla La Esther.

**b)** Las interpretaciones realizadas sobre la base de las evidencias relevadas permiten concluir que la falla La Esther es una estructura que forma parte del Sistema de Fallas Comechingones y sería la responsable de la formación de una morfoestructura con las características de un *piedmont foreland* en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones.

**c)** La presencia de la falla La Esther, que forma el límite del flanco externo del *piedmont foreland*, donde se concentra la deformación neógena-cuaternaria, permite concluir que existen evidencias del frente activo de deformación en el piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones en el entorno a los 32° 43' 18" S y 65° 58' 28" O, entre las localidades de Papagayos y Villa del Carmen.

**d)** Los valores de  $M_s$  y  $M_w$  obtenidos en la aproximación realizada por medio de fórmulas empíricas, junto a las deformaciones y morfologías relevadas en este trabajo, permiten concluir que la falla La Esther tendría potencial para generar fuertes terremotos.

**e)** Se considera de importancia mencionar que en un radio de 100 km de la falla La Esther se encuentran ubicadas varias centrales hidroeléctricas, una central nucleoelectrica, importantes centros turísticos y un emplazamiento urbano con cerca de 200.000 habitantes, y como hasta el presente no se conoce con certeza el potencial para generar fuertes terremotos que posee esta falla, es posible que el peligro sísmico asociado a esta estructura puede estar siendo subestimado.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

El diseño del estudio, análisis e interpretación de los datos y la redacción del borrador original fue elaborado por Guillermo Sagripanti. Los autores Guillermo Sagripanti y Daniel Origlia realizaron la revisión del manuscrito, edición final y aprobación del manuscrito final.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores expresan que no existe algún conflicto de interés.

## AGRADECIMIENTOS

Al editor temático MSc. Norberto Jorge Bejerman, a los revisores por el tiempo dedicado a la lectura crítica del manuscrito, observaciones y sugerencias que han permitido mejorar este artículo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, P., Castro de Machuca, B. y Beck, S. (2005). Comparative seismic and petrographic crustal study between the Western and Eastern Sierras Pampeanas region (31°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60 (4): 787-796.
- Bonilla, M., Mark, R. y Lienkaemper, J. (1984). Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length, and surface fault displacement. *USGS. Open-File Report* 84-256. Version 1.1.
- Bull, W. (2008). *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology*. Blackwell Publishing, 316 p., London
- Candiani, J., Ojeda, G. y Ulacco, H. (2016). Hoja Geológica 3366-II Villa Merlo. Provincia de San Luis y Córdoba. *Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino*. Boletín N° 415, 134 p., Buenos Aires.
- Castaldi, G., Villalba, D. y Sagripanti, G. (2021a). Evidencias de deformación cuaternaria asociadas a la falla Villa del Carmen. Extremo sur del Sistema de Fallas de Comechingones. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *18° Reunión de Tectónica, San Luis. Libro de Resúmenes* pág. 29.
- Castaldi G., Villalba, D., Sagripanti, G. y Degiovanni, S. (2021b). Evidencias de actividad cuaternaria asociadas a la falla La Aguada, piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78 (4): 497-511.
- Chiesa, J., Basaez, A., Navío, J., Lucero, N., Ojeda, G. y Strasser, E. (2011). Mioceno-Plioceno estratigraphy of the San Luis Province, Argentina. *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*. SCS Publisher. 75-89.
- Chiesa, J., Lucero N. y Basaez, A. (2019). Estratigrafía, paleontología y evidencias paleoambientales del Pleistoceno de San Luis. *Opera lilloana* 52, *Mioceno al Pleistoceno del centro y norte de Argentina*: 420-445.
- Costa, C.H. (1999). Rasgos estructurales del territorio argentino, tectónica cuaternaria en las Sierras Pampeanas. *Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR. Geología Argentina, Anales* 29: 779-784.
- Costa, C. (2019). La migración del frente de corrimiento neotectónico de las Sierras Pampeanas y su importancia morfológica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76 (4): 315-325. Número especial: Tectónica.
- Costa, C. y Morla, P. (1996). Algunos rasgos estructurales de la depresión del río Conlara, provincias de San Luis y Córdoba. *13° Congreso Geológico Argentino, Actas* 2: 283, Buenos Aires.
- Costa, C. y Vita Finzi, C. (1996). Late holocene faulting in the southeast Sierras Pampeanas of Argentina. *Geology, Vol.* 24 (12): 1127-1130.
- Costa, C., Ortiz Suarez, A., Gardini, C., Chiesa, J., Ojeda, G., Strasser, E., Escayola, M., Kraemer, P., Ulacco, H., Morla, P., Almandoz, G. y Coniglio, J. (1998). *Hoja Geológica 3366-II, Santa Rosa. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín* N° 373, 106 p., Buenos Aires.
- Costa, C., Gonzalez Díaz, E., Murillo, M., Gardini, C., Giaccardi, A., Sequeiros, J. y Bea, S. (1999). Morfoneotectónica del frente de levantamiento andino de la Sierra de Comechingones, Provincia de Córdoba y San Luis. *14° Congreso Geológico Argentino, Actas* 1: 32-33.
- Costa C.H., Machette, M.N., Dart, R., Bastias, H., Paredes, J., Perucca, L., Tello, G. y Haller, K. (2000). Mapa and Database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. *International Lithosphere Program, USGS. Open-file report* 00-0108: 81p.
- Costa, C.H., Murillo, V., Sagripanti, G.L. y Gardini, C. (2001). Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Seismology* 5: 399-409.
- Costa, C., Massabie, A., Sagripanti, G., Brunetto, E. y Coppolecchia, M. (2014). Neotectónica. *Relatorio 19° Congreso Geológico Argentino, Actas*: 725-746, Córdoba.
- Costa, C.H., Owen, L.A., Ricci, W.R., Johnson, W.J. y Halperin, A.D. (2018). Holocene activity and seismogenic capability of intraplate thrusts: Insights from the Pampean Ranges, Argentina. *Tectonophysics* 737: 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.05.002>
- Costa, C., Morla, P., Hauriab, N. y Garroa, H. (2019). The structural framework of an intermountain basin in the Pampean Ranges of Argentina; the Conlara depression. *Journal of South American Earth Science* 96: 102387.
- Costa, C., Owen, L., Johnson, W. y Kirby, E., (2021). Quaternary activity and seismogenic potential of the Sierra Chica Fault System, Argentina. *Journal of South Am. Earth Sc.* <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103328>

- De Polo, C. y Slemmons, B. (1990). Estimation of earthquake size for seismic hazards. *Geological Society of America. Vol. III*, p. 1-22.
- Gordillo, C.E. y Lencinas, A.N. (1979). Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba. Actas: 577-650.*
- Ikeda, Y. (1983). Thrust-front migration and its mechanism: Evolution of intraplate thrust systems. *Bulletin Department Geography University Tokyo 15: 125-159.*
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Bremer, J. y Ramos, V. (1983). Andean Tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate. *Geological Society of America Bulletin 94: 341-361.*
- Jordan, T. y Allmendinger, R.W. (1986). The Sierras Pampeanas of Argentina; a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation. *American Journal of Science 286: 737-764.*
- McCalpin, J.P. (2009). *Paleoseismology*. Academic Press Inc., 615 p., California.
- Massabie, A. (1987). Neotectónica y sismicidad de la región de Sierras Pampeanas Orientales, Sierras de Córdoba, Argentina. *10° Congreso Geológico Argentino, Simposio de Neotectónica, Actas: 271-274, Tucumán.*
- Morla, P. y Costa, C., (2004). El frente de levantamiento de la Sierra de Comechingones, entre Papagayos y Villa del Carmen (Provincia de San Luis). *Resúmenes 12° Reunión sobre Microtectónica y Geología Estructural: 26.*
- Murillo, M.V. (1996). *Neotectónica del flanco occidental de la Sierra de Comechingones, entre los arroyos Piedra Blanca y San Miguel, provincia de San Luis*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Buenos Aires (inédita), 135 p., Buenos Aires.
- Pilger, R. (1981). Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of America Bulletin, Part 1, 92: 448-456.*
- Ramos, V. (1999). Rasgos estructurales del territorio argentino. *Geología Argentina. Anales 29 (24): 715-784.* Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Ramos, V., Cristallini, E. y Pérez, D. (2002). The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences 15: 59-78.*
- Reiter, L., 1988. *Earthquake hazard analysis*. Columbia University Press. 241p.
- Richardson, T., Gilbert, H., Anderson, M. y Ridgway, K. D. (2012). Seismicity within the actively deforming Eastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Geophysics 188:408-420.*
- Sagripani, G.L. (2021). Evidencias de actividad cuaternaria asociadas a fallas ubicadas entre 32°27' y 32°44' LS. Piedemonte occidental de la Sierra de Comechingones, San Luis. *18° Reunión de Tectónica, San Luis. Libro de Resúmenes* pág. 78.
- Sagripani, G. y Villalba, D. (2020). Deformaciones holocenas en el piedemonte oriental de la Sierra de Comechingones. Falla Las Lagunas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 77 (2): 245-260.*
- Sagripani, G., Villalba D., Bettiol A. y Seitz, C. (2009). Sismicidad y paleosismicidad en la región sur de la provincia de Córdoba. Análisis del peligro y riesgo sísmico asociado. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 23: 45-53.* ISSN 1851-7838.
- Sagripani, G.L., Schiavo, H.F., Felizzia, J., Villalba, D., Aguilera, D., Giaccardi, A. y Membrives, J. (2011). Fuertes paleosismos de intraplaca y sus retornos vinculados a la falla Las Lagunas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 68: 52-70.*
- Sagripani, G.L., Villalba, D. y Villegas, M. (2012). Nuevas evidencias de deformaciones cuaternarias asociadas a la falla Sierra Chica. Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 69 (4): 624-639.*
- Sagripani, G.L., Villalba, D., Villegas, M., Castaldi, G., Benito, E. y Muratore, N. (2014). Avances en la Valoración del Peligro Sísmico en Fallas con Actividad Cuaternaria. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. *Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente 32: 93-105.*
- Sagripani, G., Villalba, D., Castaldi G., Giménez, M., Aguilera, D. y Giaccardi, A. (2018). Actividad cuaternaria asociada a la falla Las Rosas, Sierras Pampeanas de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 75 (3): 409-424.*
- Sagripani, G., Villalba, D. y Andreazzini, J. (2022). Actividad cuaternaria entre el piedemonte y la planicie orientales de la Sierra de Comechingones asociada a la falla Santa Catalina. Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina 79 (2): 198-217.*

- Santa Cruz, J. (1973). Informe del mapa geológico final del Valle del Conlara, San Luis. C.A.A.A.S. *Dirección Nacional de Geología y Minería*, Inédito. Buenos Aires.
- Santa Cruz, J. (1979). Geología de las unidades sedimentarias aflorantes en el área de las cuencas de los ríos Quinto y Conlara. Provincia de San Luis. República Argentina. *7° Congreso Geológico Argentino. Actas 1:335-349*. Neuquén.
- Sato A.M., González, P.D. y Llambías, E.J. (2003). Evolución del orógeno Famatiniano en la Sierra de San Luis: magmatismo de arco, deformación y metamorfismo de bajo a alto grado. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58 (4): 487-504.
- Smalley, R.Jr., Pujol, J., Regnier, M., Chiu, J.M., Chatelain, J.L., Isacks, B.L., Araujo, M. y Puebla, N. (1993). Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behavior. *Tectonics* 12: 63-76.
- Somerville, P. (2006). Review of magnitude-area scaling of crustal earthquakes. *Rep. to WGCEP, 22.*, URS Corp., Pasadena.
- Villalba, D., Castaldi, G. y Sagripanti, G. (2017). Nuevas evidencias de actividad cuaternaria en la Sierra de Comechingones: falla La Esther. *20° Congreso Geológico Argentino, Actas: 192-193*, Tucumán.
- Wells, D. y Coopersmith, K. (1994). New empirical relationships among magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84, p. 974-1.002.
- Wyss, M. (1979). Estimating maximum expectable magnitude of earthquakes from fault dimensions. *Geology* 7, 336-340.

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>  
Carretero S.C., Rodrigues Capítulo L., Dell' Arciprete D.D. y Kruse E.E.  
Zonación química vertical del acuífero costero bonaerense: comportamiento de la interfase  
e008, <https://doi.org/10.59069/24225703e008>

## Zonación química vertical del acuífero costero bonaerense: comportamiento de la interfase

### Vertical chemical zonation of the coastal aquifer of buenos aires: the interface behavior

 Silvina Claudia Carretero<sup>1,2\*</sup>   Leandro Rodrigues Capítulo<sup>1,2</sup>   
 Daiana Denise Dell' Arciprete<sup>1,2</sup>   Eduardo Emilio Kruse<sup>1,2</sup> 

\* Contacto

Recibido: 29 de mayo de 2023 • Aceptado: 20 de julio de 2023 • Publicado: 3 de agosto de 2023

#### Resumen

La presencia de zonación química en el agua subterránea frecuentemente se relaciona con la serie de Chebotarev y en general se presenta de forma lateral desde la zona de recarga hasta la descarga. En el acuífero costero del Partido de La Costa, Buenos Aires, se detectó una zonación química vertical. El objetivo del trabajo fue evaluar el comportamiento de la interfase de la zonación química vertical ya que este conocimiento es de importancia para los prestadores de servicio de agua potable a la hora de planificar la profundidad de las perforaciones. Se concluye que se trata de una interfase naturalmente dinámica influenciada por las condiciones hidrológicas y el ambiente geomorfológico.

**Palabras clave:** acuífero costero, conductividad eléctrica, interfase.

#### Abstract

The presence of groundwater chemical zonation related to Chebotarev sequence in general is presented in lateral disposition from the recharge to the discharge zone. In the coastal aquifer in the Partido de La Costa, Buenos Aires, a vertical chemical zonation was detected. The aim of this work was to evaluate the behavior of the interface in the vertical chemical zonation due to its importance for the drinking water supply service when planning the wells depth. It is concluded that the interface is naturally dynamic, influenced by the hydrogeological conditions and the geomorphological environment.

**Keywords:** coastal aquifer, electrical conductivity, interface.

1. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

2. Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.

## Introducción

El manejo de los recursos hídricos en las localidades de la costa arenosa de la provincia de Buenos Aires es de gran importancia debido a sus limitadas reservas y la creciente demanda que requieren en épocas estivales. Esto se asocia a la principal actividad económica que es el turismo.

En San Clemente del Tuyú, Partido de La Costa (PDLC), Buenos Aires, sólo un bajo porcentaje de los habitantes obtienen agua potable de red a partir del servicio otorgado por la Cooperativa de Obras y Servicios. El resto de la población se abastece de manera particular consumiendo agua sin tratamiento y utilizando el recurso sin ningún tipo de control de caudales.

El conocimiento del espesor del sistema acuífero y la calidad química son relevantes para la gestión a la hora de establecer metodologías y caudales de explotación.

En el campo de bombeo, ubicado fuera del área urbanizada al sur de la localidad, no se poseían registros de perforaciones profundas, sino que se han manejado con datos a nivel regional (Consejo Federal de Inversiones, 1989). Tampoco se había evaluado la existencia de variaciones químicas en profundidad por falta de los mencionados pozos.

La presencia de zonación química en el agua subterránea frecuentemente sigue el patrón de comportamiento definido en la serie de Chebotarev y en general se presenta de forma lateral desde la zona de recarga hasta la descarga.

Sin embargo, en el acuífero costero en estudio, se de-

teció una zonación química vertical que fuera analizada por primera vez por Carretero et al. (2016) donde los resultados indicaron que el acuífero no es homogéneo en cuanto a su calidad química. Se diferenciaron dos zonas, A y B, donde la primera presenta aguas de baja salinidad y de tipo bicarbonatado cálcico, mientras que la segunda posee elevada salinidad y el agua se clasifica como clorurada sódica.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento de la interfase de la zonación química vertical que divide al acuífero en zonas A y B. Dicho propósito resulta relevante ya que este conocimiento es de importancia para los prestadores de servicio de agua potable como una herramienta básica para definir la profundidad de las perforaciones de explotación y así evitar un proceso de salinización desde los niveles inferiores.

## Zona de estudio

El área de estudio corresponde a la costa arenosa de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Partido de La Costa) (Figura 1A).

El clima es templado húmedo, con una estación seca en los meses fríos (abril-septiembre) y una húmeda en los meses cálidos (octubre-marzo). La precipitación media anual oscila entre los 900 y 1000 mm, donde el 60% se produce en los meses con mayor evapotranspiración (cálidos) por lo que la mayor recarga del agua subterránea se produce durante la estación fría (Carretero y Kruse, 2012).

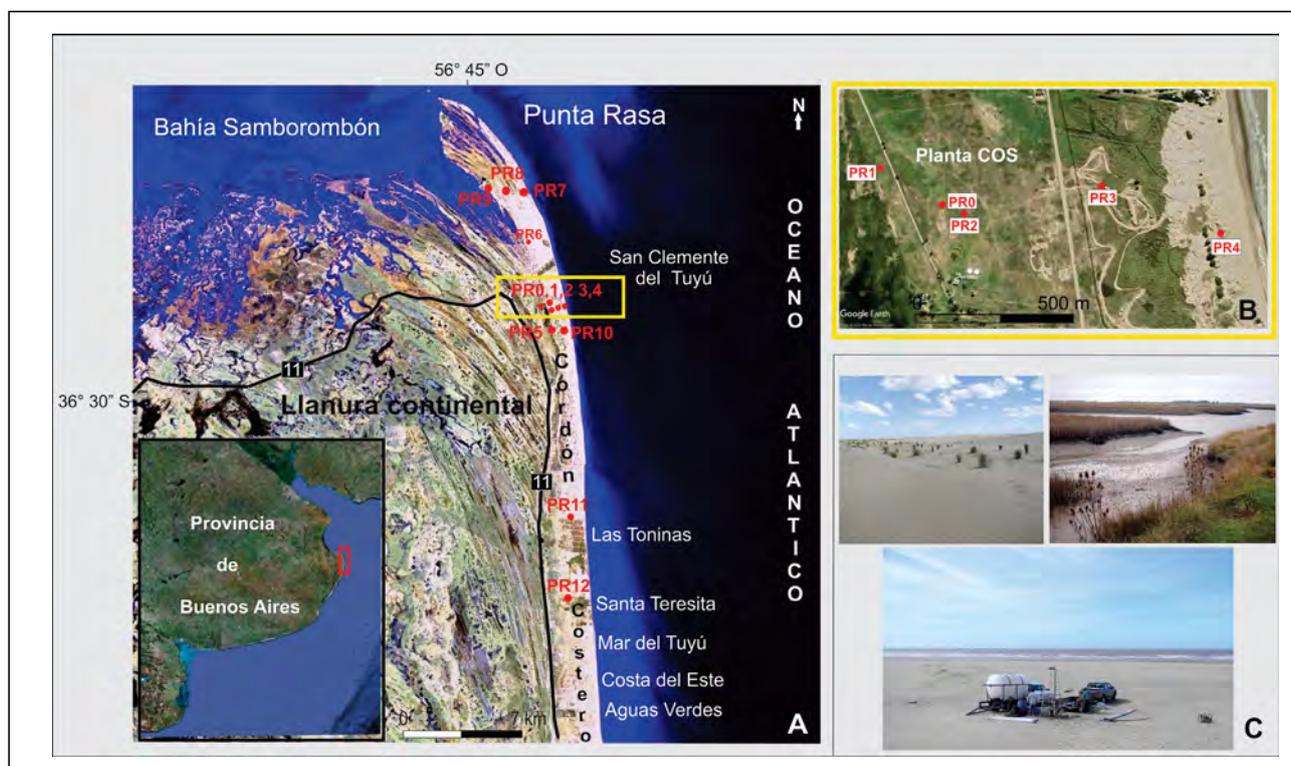


Figura 1. A) Área de estudio, B) detalle del sector de la planta de la cooperativa de agua (COS) en recuadro amarillo, C) ambientes geomorfológicos: izquierda, cordón costero; derecha, llanura deprimida; abajo, sector de playa.

El perfil estratigráfico realizado por Carretero et al. (2022a) correlacionando las muestras analizadas con las formaciones geológicas definidas por Violante et al. (2001) indica que hasta los 3,5 m de profundidad se observa una arena clara, de origen eólico, con fragmentos de conchillas que corresponde a la Formación (Fm) Punta Médanos. Por debajo y hasta los 8 m aparecen arenas más oscuras lo cual se correlaciona con el ambiente de barrera de la Facies Mar de Ajó (Fm Pozo nº 17). En adelante y hasta los 11 m se detecta una arena más oscura y fina, muy arcillosa con fragmentos de conchillas. Luego de los 11 m la litología cambia a arcillas arenosas con conchillas que gradan a arcilla gris con fragmentos de conchillas gruesas (5 mm) lo cual constituye la Facies Destacamento Río Salado de la Fm Pozo nº 8. Desde el punto de vista hidrológico la Fm Punta Médanos, la Facies Mar de Ajó y la parte superior de la Facies Destacamento Río Salado constituyen la unidad acuífera, mientras que los niveles arcillosos se comportan como acuitado/acuícludo.

Se reconocen dos ambientes geomorfológicos (Figura 1C), el cordón costero y la llanura deprimida. El primero se caracteriza por la presencia de arenas finas con agua subterránea de baja salinidad, principalmente del tipo  $\text{Ca-HCO}_3$  y  $\text{Na-HCO}_3$ . En el segundo predominan los materiales limosos y arcillosos, y contiene agua de elevada salinidad, tipo Na-Cl.

El acuífero freático presenta un espesor promedio de 10 m y está limitado por dos interfases, hacia el continente agua dulce-agua salobre y hacia el mar, agua dulce-agua salada siendo la única fuente de provisión de agua dulce para la población. El sector central del cordón costero es la zona de recarga principal, que se produce a partir de los excesos de las precipitaciones, la conducción se efectúa en un corto tramo, y se da la descarga en dos direcciones opuestas, una hacia el mar y la otra al oeste hacia la llanura deprimida.

Como se ha mencionado, el espesor del acuífero se ve limitado por una zonación química y un gradiente vertical de la conductividad eléctrica (CE), la cual se incrementa abruptamente entre los 5-7 m de profundidad (Carretero et al. 2016). En términos generales, la divisoria de agua subterránea coincide con las máximas alturas topográficas siguiendo una línea imaginaria orientada en sentido norte-sur.

Se reconocen procesos puntuales de intrusión salina (Santa Teresita) los cuales se vinculan con una extracción intensiva del recurso que favorece el avance del frente salino proveniente del mar.

## Metodología

Se realizaron 13 pozos de reconocimiento (PR) (Figura 1A, B) abarcando el espesor total de la unidad acuífera. Los pozos fueron diseñados con cañería ranurada en la totalidad de su extensión para permitir el normal funcionamiento del flujo subterráneo.

Mediante una sonda Solinst TLC meter se midió la CE del agua y profundidad en los PR en mayo-15, octubre-16,

abril-17, julio-17, octubre-18, diciembre-20, marzo-21, julio-21, septiembre-21, diciembre-21 y marzo-22.

Se realizaron perfiles de CE vs profundidad para las diferentes fechas de control, se agruparon los perfiles de acuerdo a su localización en los ambientes: sectores al oeste del cordón costero, sector central, y al este, relacionado además con zonas de descarga y recarga principal.

Se confeccionaron diversos gráficos para evaluar la relación entre la CE promedio de la zona B y los niveles freáticos. También se estudió la relación entre la variación de la profundidad de la interfase, los niveles freáticos y los excesos del balance hídrico.

Para la determinación de los excesos de agua se efectuaron balances hídricos diarios de acuerdo a los datos de precipitación disponibles y los valores de ETo (evapotranspiración de referencia) media diaria estimadas según el método de Penman-Monteith (Allen et al. 1998) utilizando el programa AGROAGUA v.5.0 (Forte Lay et al. 1995). De acuerdo a las características de los sedimentos (Carretero et al. 2022a) asociado a su elevada permeabilidad, en general, no se observan procesos de escurrimiento superficial y se considera que los excesos del balance se transforman directamente en recarga al acuífero dentro del ambiente de médanos costeros.

## Resultados

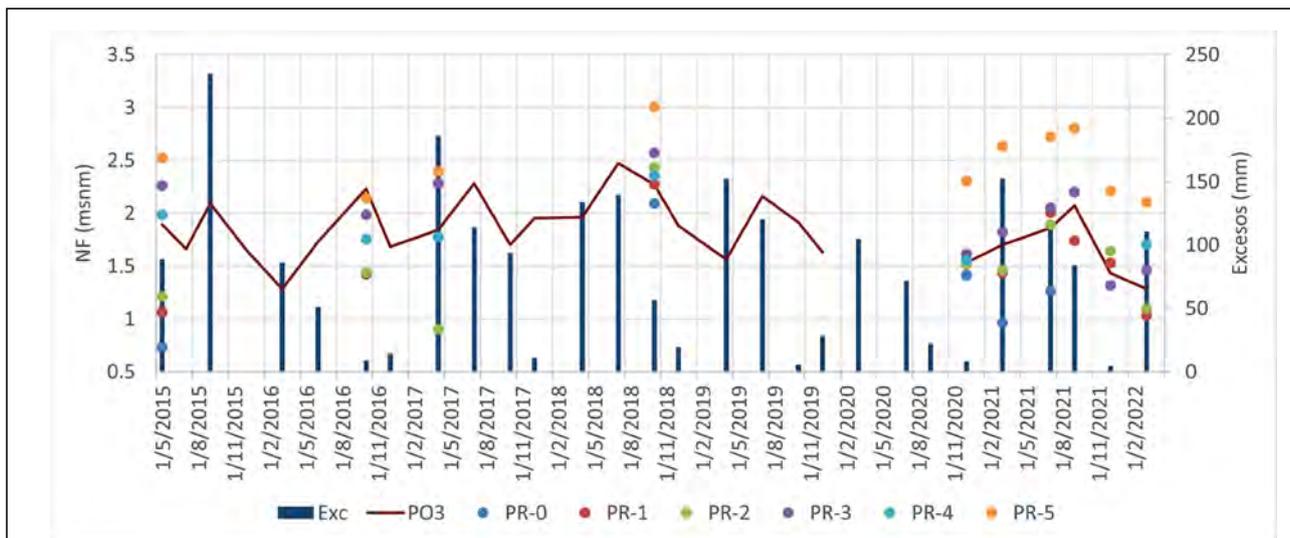
### Variaciones de nivel freático

Debido a que las mediciones de CE en los PR, en principio, no fueron tomadas con un paso de tiempo homogéneo se graficó el comportamiento del nivel freático del pozo de observación (PO3) ubicado a 5 m de PR-3 (Figura 2) para analizar el funcionamiento de la capa freática durante el periodo estudiado.

En general, se observa una relación directa entre los niveles freáticos y los excesos del balance hídrico excepto en algunas mediciones de PR-0, PR-1 y PR-2 lo cual podría ser consecuencia de la extracción de agua en el campo de bombeo en donde se encuentran ubicados. Este comportamiento generalmente ocurre entre marzo-abril, luego de la temporada turística, y reflejaría la explotación intensiva en los meses de verano. Los niveles más altos se observan en julio-18 para PO3 y para los PR en octubre-18, producto de los elevados excesos acumulados en los meses previos al monitoreo.

### Variaciones de CE según el ambiente

Para PR-1 (Figura 3A), localizado en la transición hacia la llanura deprimida, la CE de la zona A oscila entre 2.000 y 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mientras que en la zona B el máximo puede exceder de 30.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valor medio de 6.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En esta perforación se observa que la interfase se desplaza entre los 6,5 y 9,5 metros bajo boca de pozo (mbbp). En mayo-15 se observó la posición más elevada, mientras que en octubre-16 toda la columna de agua presenta valores



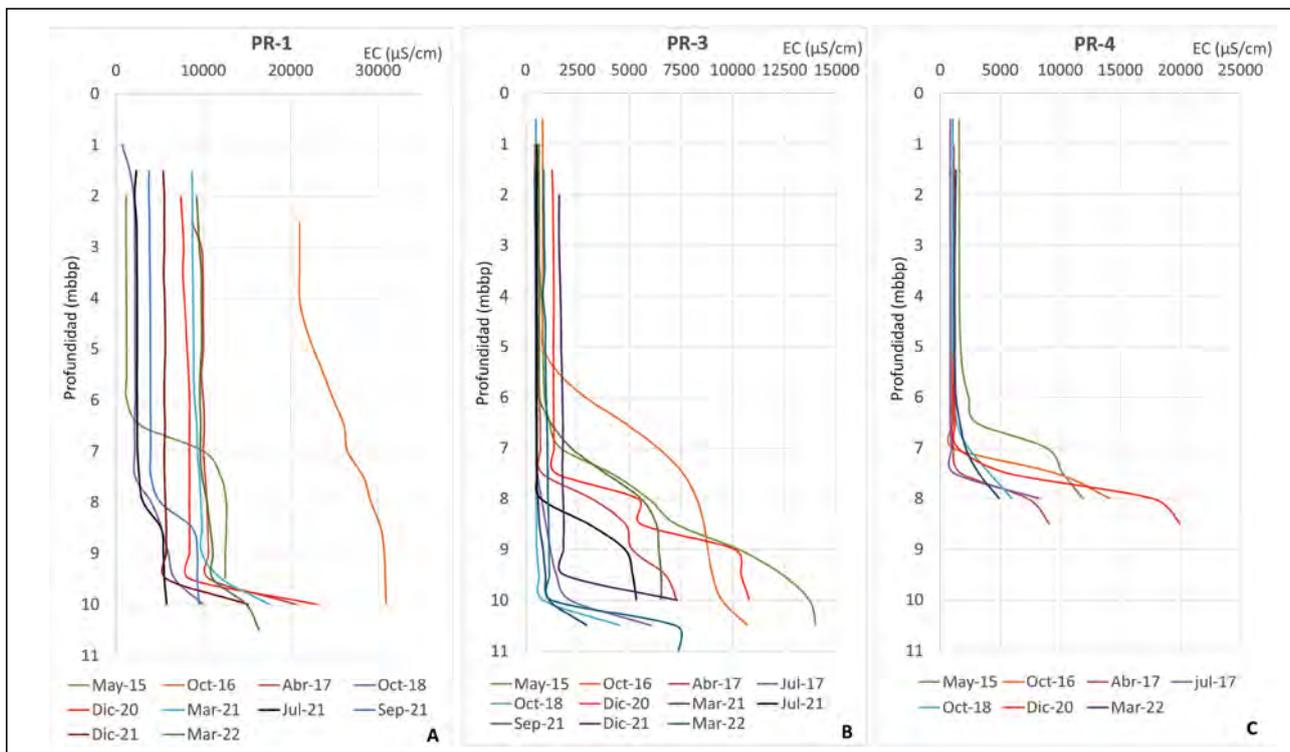
**Figura 2. Variaciones del nivel freático (NF) para PO3 medidos cada 90 días aproximadamente y excesos acumulados en el mismo periodo. En 2020 se vio interrumpido el registro hasta diciembre donde pudo retomarse las mediciones. Los puntos indican los niveles para los PR en las fechas correspondientes.**

mayores a 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  los cuales se incrementan con la profundidad de manera gradual llegando al máximo de casi 31.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con la consecuente desaparición de la zona A. En abril-17 la zona A se manifiesta con sus valores medios en el orden de 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y la zona B con 20.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a los 9,5 mbbp.

En el caso de PR-3 (Figura 3B), ubicado en el centro del médano, la interfase se desplaza entre los 5 y los 10 mbbp. El momento donde la interfase se encuentra más elevada,

alrededor de los 5 mbbp, es en octubre-16. Para octubre-18 se da la situación donde la interfase se observa a mayor profundidad (10 mbbp). La CE para la zona A oscila entre 700 y 1.800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en cambio para la zona B estos valores se encuentran entre 3.000 y 14.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

El pozo PR-4 (Figura 3C) se localiza en la playa, en la zona de descarga hacia el mar. La interfase es más uniforme en este caso, encontrándose en la mayoría de las mediciones a 7,5 mbbp, oscilando entre 6,5 y 8 mbbp. La CE promedio de



**Figura 3. Perfiles de conductividad eléctrica en diferentes fechas para los pozos A) PR1, B) PR3, C) PR4 localizados al oeste, centro y este del cordón costero respectivamente.**

la zona A es del orden de los  $1.200 \mu\text{S}/\text{cm}$  y la zona B oscila entre  $3.000$  y  $20.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

Además de las observaciones realizadas según el ambiente geomorfológico fue necesario estudiar el comportamiento respecto de la localización, de norte a sur, donde también se reconocieron diferencias.

En el perfil oeste-este, tanto para la zona A como la B, la CE en sus valores medios en el sector norte desciende en dirección W-E (Figura 4A). Para el sector sur, el valor medio más bajo se observa en la zona central y el más alto al oeste (Figura 4B).

Para el perfil norte-sur, en la zona A el mayor valor medio se observa al sur (afectación por bombeo), pero en la zona B se localiza en el centro del perfil (Figura 4C). Una disminución en la concentración de la CE media en sentido N-S se observa para ambas zonas en el sector central (Figura 4D).

Para el sector este del perfil, en la zona A se presentan

valores similares, mientras que en la zona B los valores más altos se obtuvieron al norte (Figura 4E).

#### Variaciones de CE según condiciones hidrológicas

Se analizó el comportamiento de la CE en dos perfiles medidos en condiciones de niveles freáticos elevados (octubre-18, Figura 5A) y niveles deprimidos (marzo-22, Figura 5B). La CE tanto para la zona A como la B es mayor en marzo-22 para todos los pozos. La diferencia es de menor magnitud para PR-4, PR-10 y PR-12. Este incremento en los valores de CE a su vez viene acompañado, en general, de una somerización de la interfase.

Enfatizando el análisis en la zona B (Figura 6A, B, C, D), en términos generales se observa que los valores de la CE disminuyen cuando suben los niveles, pero esta relación no es tan clara en todos los casos y fechas analizadas. Sí se verifica una coincidencia entre los valores más elevados den-

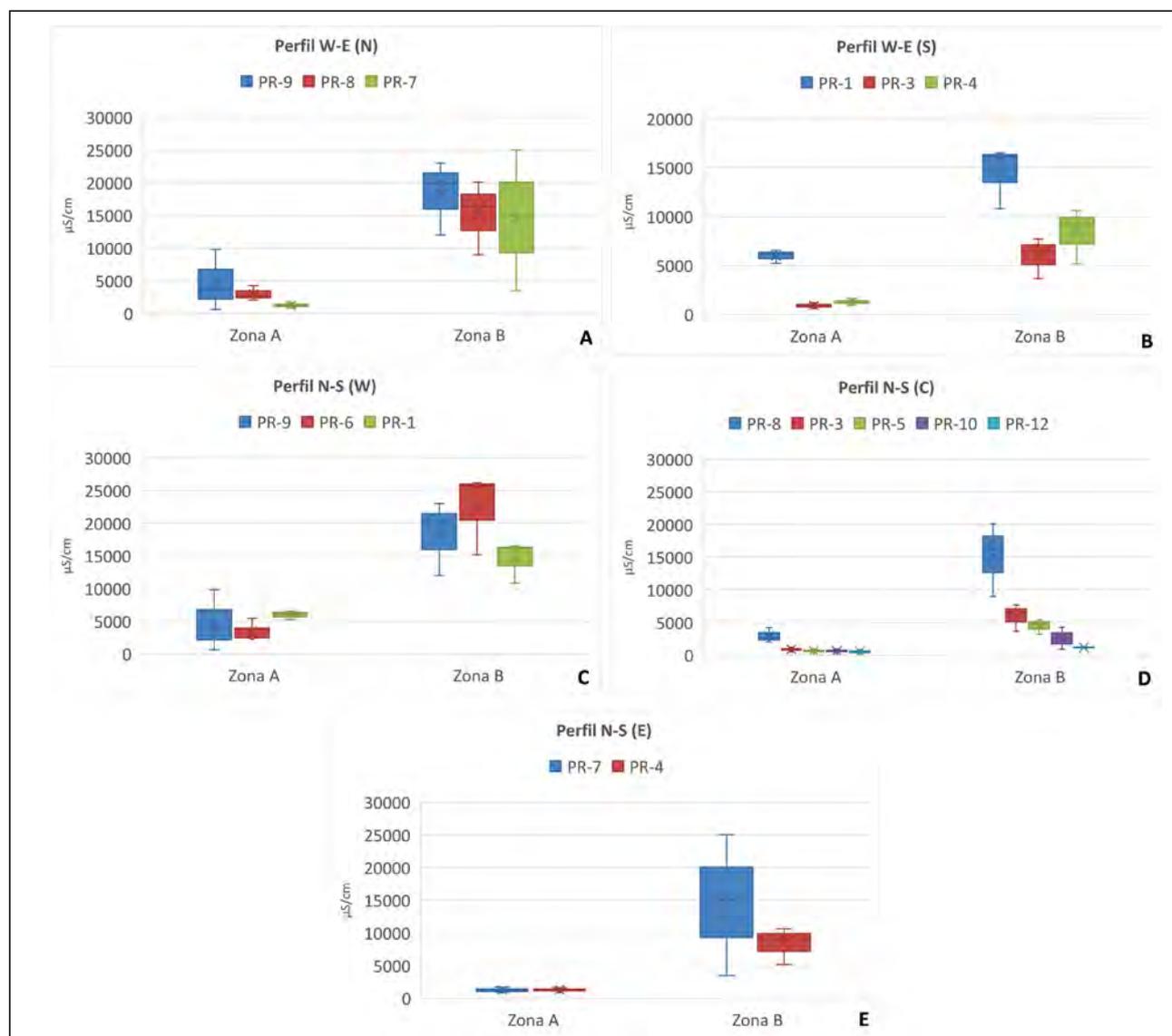


Figura 4. Diagramas de cajas y bigotes para la zona A y B organizados según la localización de los PR. A) Perfil W-E sector norte; B) Perfil W-E sector sur; C) Perfil N-S, sector oeste; D) Perfil N-S, sector central; E) Perfil N-S, sector este.

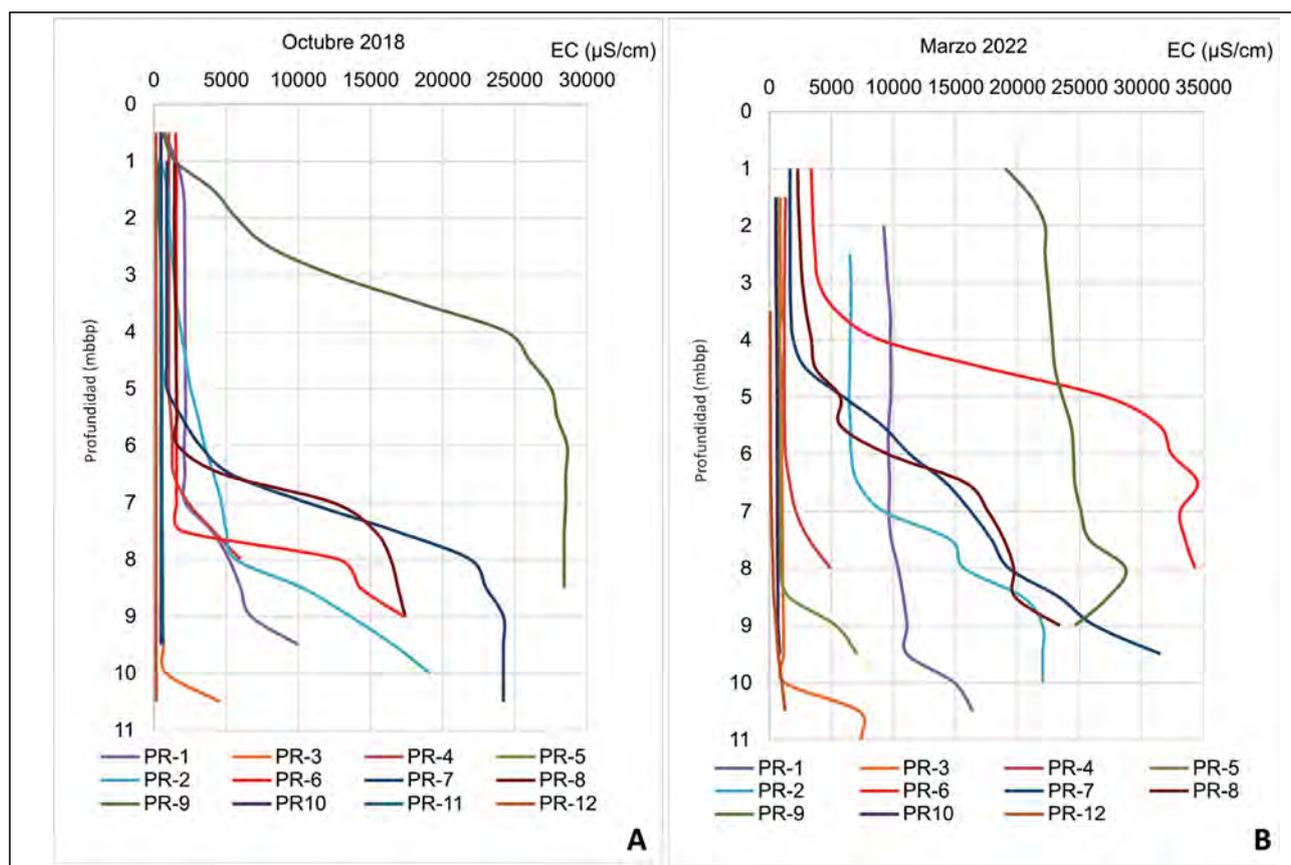


Figura 5. Perfiles de CE para dos situaciones hidrológicas diferentes A) niveles freáticos elevados: octubre-2018; B) niveles freáticos deprimidos: marzo-2022.

tro del periodo monitoreado y la CE más baja en octubre-18 para todos los pozos.

En la Figura 6B se puede observar el comportamiento para PR-3 donde hasta diciembre-20 existe una relación inversa entre niveles y CE, pero a partir de esa fecha la relación parece invertirse y se vuelve poco clara hasta marzo-22.

Para PR-4 (Figura 6C) las menores concentraciones medias de CE están en el orden de los 4.000 µS/cm. Esta situación ocurre tanto en octubre-18, coincidiendo con el nivel más elevado, como en marzo-22 cuando el mismo se encontraba 0,65 m más profundo.

En el caso del PR-5 (Figura 6D) para octubre-18 la zona B desaparece coincidiendo con la instancia de niveles más elevados.

## DISCUSIÓN

En el acuífero costero del PDLC se detectó una zonación química vertical, cuyo origen y comportamiento se ha ido estudiando en el tiempo. Carretero et al. (2016) analizaron por primera vez la relación entre la litología, la CE del agua subterránea y la respuesta eléctrica en los materiales que componen al acuífero. Los resultados indicaron que el acuífero es homogéneo en cuanto a su litología, pero no a su calidad química. Existe una zonación que permite diferenciar

unidades con agua subterránea de baja conductividad eléctrica (< 1.500 µS/cm) hasta los 5 y 7 m de profundidad. Por debajo los valores se incrementan, alcanzando 18.000 µS/cm a los 11 m. Se encontró una buena correlación entre los valores de conductividad eléctrica del agua y los modelos de resistividad propuestos, pudiéndose verificar la efectividad del método en determinar estas variaciones.

Posteriormente Carretero et al. (2017) realizaron análisis químicos en ambos sectores de la zonación definida por la CE. Estos análisis confirmaron que la zonación manifestada en los cambios de CE se corresponde con una mayor concentración de cationes y aniones en profundidad. De esta manera la unidad acuífera arenosa se dividió dos zonas de acuerdo a sus características químicas. La zona A (0 - 6 m) es el sector caracterizado por aguas bicarbonatadas cálcicas y la zona B (> 6 m) la que presenta aguas cloruradas sódicas. Las concentraciones de la totalidad de los cationes y aniones de la zona B la convierten en no apta para consumo humano. En ese trabajo se discute sobre la necesidad de realizar más estudios para establecer el origen de la elevada salinidad que caracteriza a las aguas más profundas. Preliminarmente se exponían algunas hipótesis mediante las cuales se podría adjudicar la elevada salinidad a un pasaje de agua vertical ascendente desde el nivel arcilloso inferior (acuitardo). Estas arcillas son de origen de marismas o lagunas costeras y contendrían agua salinizada. Adicionalmente, se planteó la posibilidad de un flujo más lento debido a una menor conducti-

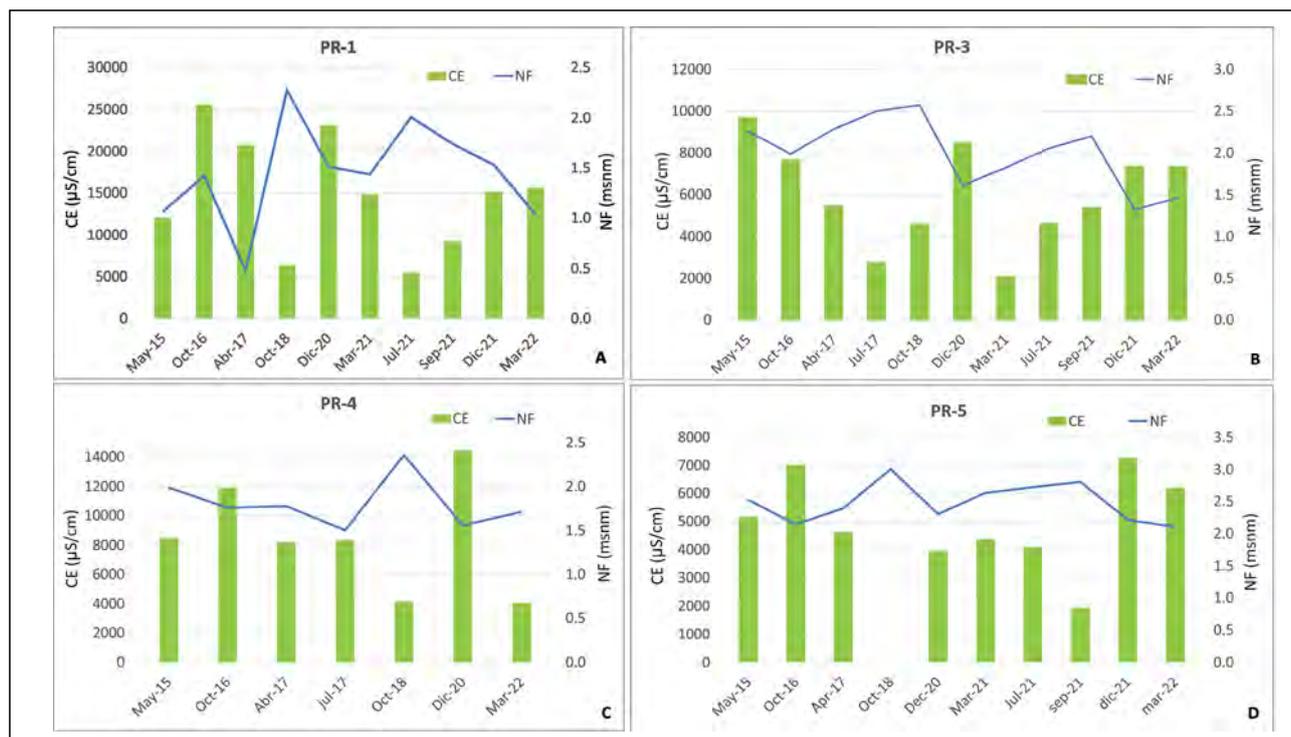


Figura 6. Relación entre la CE promedio de la zona B y los niveles freáticos (NF) para los pozos A) PR1, B) PR-3, C) PR-4 y D) PR-5.

vidad hidráulica consecuencia del incremento del contenido de arcillas en profundidad y menor gradiente hídrico. Dicha condición permitiría un mayor tiempo de residencia del agua en contacto con los sedimentos portadores de agua salada.

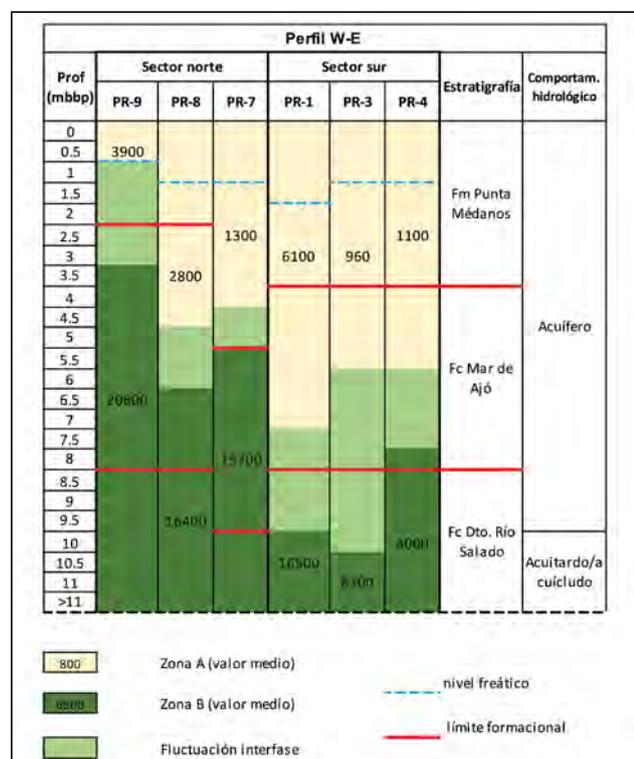
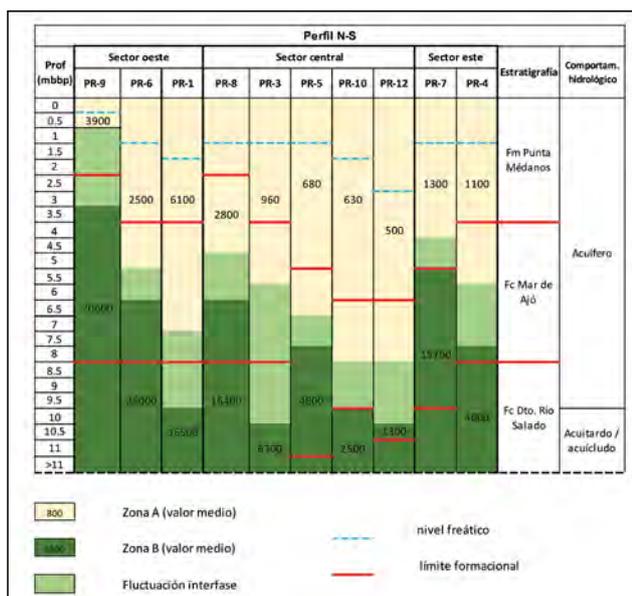


Figura 7. Perfil hidrológico y relación con las zonas A y B, junto con los rangos de fluctuación de la interfase para el perfil W-E.

Recientemente Carretero et al. (2022b) anexaron a los datos hidroquímicos las relaciones isotópicas mediante el uso de los isótopos estables deuterio ( $^2\text{H}$ ) y oxígeno-18 ( $^{18}\text{O}$ ). Los resultados indicaron que el agua de las zonas A y B son diferentes. Existe una variabilidad en la composición isotópica y en la salinidad de la zona B, en los diferentes pozos analizados y entre muestreos. Se observó, además, que el contenido isotópico de la zona B se encuentra más enriquecido y con valores de exceso de deuterio menores al 10 % comparado con las muestras de las aguas de la zona A. De acuerdo a los datos disponibles hasta el momento, tanto las variaciones isotópicas como en salinidad podrían explicarse por la ocurrencia de varios procesos que podrían estar actuando simultáneamente, pero no estarían relacionados al agua salada contenida en las arcillas del acuitardo ya que el origen es meteórico.

Los acuíferos alojados en las dunas costeras constituyen reservorios de agua dulce que pueden resultar la única fuente de abastecimiento a poblaciones (Custodio, 2010). El riesgo potencial de intrusión salina es un factor a tener en cuenta en la gestión de un acuífero costero. La planificación a largo plazo es más una excepción que la regla, lo cual se relaciona, entre otras causas, con la falta de conocimiento del sistema (Cheng y Ouazar, 2004). En general, la planificación comienza cuando un problema de intrusión salina ha sido detectado o se percibe el riesgo en un futuro inmediato. Usualmente en los ambientes costeros la contaminación del agua dulce con agua salada proviene de la intrusión de agua marina en el continente, pero dependiendo las características químicas del acuífero, también se puede producir desde niveles más profundos. Tal fue el caso descrito en el



**Figura 8. Perfil hidrológico y relación con las zonas A y B, junto con los rangos de fluctuación de la interfase para el perfil N-S.**

campo de extracción de San Clemente (Carretero et al. 2017) donde se ha observado un desmejoramiento de la calidad química del agua en el área de captación con una extracción más intensiva y menos rotación de uso de las perforaciones. Durante el bombeo se produjo una salinización de los pozos proveniente de los niveles inferiores (zona B). Este fenómeno ha sido detectado por variadas metodologías: medición de CE in situ, registro continuo de CE durante la temporada y por medio de una tomografía eléctrica.

Hasta ese momento se suponía que la interfase entre las zonas A y B oscilaba producto de la extracción de agua por bombeo, pero de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, a estas variaciones se le suman los movimientos naturales asociados al ciclo hidrológico. Esto es de destacar ya que la profundidad de colocación de los filtros suele ser fija, alrededor de 6 m, pero la localización de la interfase no lo es. Esto representaría un riesgo mayor de salinización en periodos de escasos excesos acompañado de la somerización de la interfase.

A modo de síntesis se presentan las Figuras 7 y 8 donde puede observarse la relación entre las formaciones geológicas, su comportamiento hidrogeológico, la profundidad del nivel freático medio, la definición de las zonas A y B y el rango de fluctuaciones. El desarrollo de los perfiles se efectuó para las transectas N-S y W-E. Se verifica que los tipos litológicos no se correlacionan con la zonación química vertical, por lo que podría inferirse que el control de la calidad química no depende, al menos de manera directa, de los mismos. No obstante, cabe destacar que en las perforaciones localizadas más al sur (PR-10 y PR-12), en la sección central del cordón costero, el espesor de la zona A se incrementa conforme aumenta el desarrollo de las unidades arenosas. También es el sector que presenta los valores más bajos de CE. La informa-

ción en estos diagramas podría ser de utilidad para los prestadores del servicio, ya que da un panorama general de la profundidad a la cual se encuentra la interfase salobre según su localización, y advierte sobre el límite para la colocación de filtros y extracción del agua subterránea.

### Conclusiones

La interfase de la zonación química vertical en el acuífero costero presenta una naturaleza dinámica, siendo sus principales forzantes las características del medio físico que la aloja y la relación entre la recarga y descarga (extracción) del sistema acuífero.

La definición de las zonas A y B es variable de una perforación a otra. En los primeros estudios se estableció que la primera correspondía a valores de CE menores a 1.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la segunda a mayores. Pero el seguimiento de esta variable en el tiempo permitió establecer que la zona A presenta CE mucho mayores en los PR localizados en la cercanía de la llanura deprimida.

Contrariamente a lo que se puede esperar en un acuífero costero, la interfase de los PR localizados en las proximidades del mar resultó ser la más estable con pocas variaciones en profundidad a lo largo del tiempo. En este caso, no se ha detectado la presencia de la cuña salina proveniente de la interfase agua dulce – agua salada marina.

Existe una relación inversa entre los niveles freáticos y la CE en la zona B. En periodos de menores excesos hídricos se produce un incremento en los valores de CE, los cuales coinciden con una somerización de la interfase.

De acuerdo a los estudios antecedentes y los resultados obtenidos en el presente trabajo, podría considerarse que el funcionamiento del acuífero costero se ve influenciado además de la recarga directa, por una recarga lateral desde la llanura deprimida. Considerando que este ambiente está conectado y recibe agua desde la Bahía de Samborombón, esta condición resultaría en diferentes proporciones de mezclas de agua. Más evidente es la influencia de la recarga durante eventos de elevadas precipitaciones que remueve y reemplaza el agua salobre, evidenciado por el descenso en los valores de la CE y la profundización de la interfase.

Estos resultados son un aporte de importancia para los prestadores de servicios de agua potable, tanto para ajustar los volúmenes y tiempos de explotación como para la planificación de nuevas perforaciones de abastecimiento.

La variabilidad en la profundidad de la interfase es un factor muy importante al momento de establecer la profundidad de explotación para evitar la salinización del sector superior del acuífero. Una mejora en el grado de conocimiento del sistema hidrológico permite realizar una explotación sustentable del recurso, evitando realizar perforaciones que extraigan agua con concentraciones por encima de los límites aceptables para consumo humano.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades y personal de la Cooperativa de Obras y Servicios de San Clemente del Tuyú (COS), Cooperativa Cosyc Las Toninas y Cooperativa de Obras y Servicios Públicos de Santa Teresita, por la colaboración brindada durante las tareas de campo y el desarrollo del estudio. Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Investigación CONICET (PIP 2310) y Proyecto de Investigación y Desarrollo (11/N967) de la UNLP.

## Contribución de autoría

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación

y el análisis de datos fueron realizados por Silvina Carretero, Leandro Rodríguez Capítulo, Daiana Dell' Arciprete y Eduardo Kruse. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Silvina Carretero y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

## Declaración de conflictos de intereses

“Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés”

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Martin Smith M. (1998). Crop evapotranspiration. *Guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage papers* 56. FAO.
- Carretero, S. y Kruse, E. (2012). Relationship between precipitation and water-table fluctuation in a coastal dune aquifer: northeastern coast of the Buenos Aires province, Argentina. *Hydrogeology Journal* (20): 1613–1621.
- Carretero, S., Perdomo, S., Kruse E. y Ainchil, J. (2016). Respuesta eléctrica de la zonación química en un nivel acuífero en la costa arenosa oriental de la Provincia de Buenos Aires. En García R. y Mariño E. (Ed.), *Calidad del agua subterránea*. (pp 93-100). Editorial Científica Universitaria.
- Carretero, S., Perdomo, S. y Kruse, E. (2017). Efectos del bombeo sobre la calidad química del acuífero costero en el sector norte del Partido de La Costa. *XX Congreso Geológico Argentino, Sesión técnica 11, Geología de los Recursos Hídricos*: 9-18.
- Carretero, S., García Galluzzi, A. y Kruse, E. (2022a). Coastal aquifer behaviour related to the textural and mineralogical characteristics of the sands in the eastern coast of the province of Buenos Aires. *Journal of South American Earth Sciences* (114). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103692>.
- Carretero, S., Rodríguez Capítulo, L., Dapeña, C., Fabiano, M. y Kruse, E. (2022b). A chemical and isotopic approach to investigate groundwater dynamics in a coastal aquifer. *Catena* (213). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106229>.
- Custodio, E. (2010). Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeology Journal* (18), 269–280.
- Cheng, A. y Ouazar, D. (2004). *Coastal Aquifer Management: monitoring, modeling, and case studies*. Lewis publishers a CRC Press Company.
- Consejo Federal de Inversiones (1989). *Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Regiones I y II Punta Rasa-Punta Médanos. Provincia de Buenos Aires Informe Final. Tomo II. Geología y Geomorfología*. Consejo Federal de Inversiones.
- Forte Lay, J.A., Aiello, J.L. y Kuba, J. (1995). *AGROAGUA v.5.0*. [Software de PC]. AGROAGUA, CIBIOM, CONICET.
- Violante, R.A., Parker, G. y Cavallotto, J.L. (2001). Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la bahía Samborombón y la laguna Mar Chiquita durante el Holoceno. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56(1), 51-66.

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>  
Rey M., Ruffo A.G., Albouy E.R. y Giorgi J.M.  
Hidrodinámica del acuífero freático del cordón de dunas septentrional del partido de Villarino, provincia de Buenos Aires, Argentina  
e009, <https://doi.org/10.59069/24225703e009>

# Hidrodinámica del acuífero freático del cordón de dunas septentrional del partido de Villarino, provincia de Buenos Aires, Argentina

## Hydrodynamics of the phreatic aquifer of the northern dune chain of the Villarino district, province of Buenos Aires, Argentina

 Matías Rey<sup>1,2\*</sup>   Andrés Gabriel Ruffo<sup>1,2</sup>   Edgardo René Albouy<sup>2,3,4\*</sup>   Juan Manuel Giorgi<sup>1,2,3</sup> 

\* Contacto

Recibido: 1 de marzo de 2023 • Aceptado: 7 de agosto de 2023 • Publicado: 10 de agosto de 2023

### Resumen

En la porción septentrional del partido de Villarino, sudoeste de la provincia de Buenos Aires, se encuentra un cordón medanoso continental. Estas acumulaciones arenosas alojan un acuífero freático con aguas de buena calidad fisicoquímica que es la principal fuente de abastecimiento de las poblaciones del área. El presente trabajo tiene como objetivo determinar las características hidrodinámicas de dicho acuífero, confeccionando un mapa piezométrico e isopáquico de la zona no saturada mediante el uso de software específico. Con estos mapas se logró identificar la morfología freática, la dirección de flujo del agua subterránea y su velocidad de movimiento, además de calcular los gradientes hidráulicos. Como resultado, se pudo definir que la dirección de flujo del agua subterránea en la zona sigue a grandes rasgos la inclinación del terreno, con los mayores niveles piezométricos tendientes a ubicarse en la porción sudeste del cordón de dunas, mientras que las cotas piezométricas más bajas se ubican en la porción noroeste. El gradiente hidráulico promedio se encuentra en torno al 3 ‰, mientras que la velocidad efectiva del agua subterránea tiene un promedio de 0,26 m/d. Los mayores espesores de la zona no saturada se registran en el sudeste de la cadena de dunas, coincidentes con las mayores cotas topográficas.

En un 90% del área considerada, el mismo no supera los 8 m. El conocimiento de la freaticimetría e hidrodinámica de un acuífero permite obtener información fundamental para la comprensión del funcionamiento del mismo, necesaria para la gestión racional y sustentable del recurso hídrico.

**Palabras clave:** agua subterránea, cordón de dunas, hidráulica.

1. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
2. Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur.
3. Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA).
4. Instituto Geológico del Sur.

## Abstract

In the northern portion of the Villarino district, in the southwest of the province of Buenos Aires, there is a continental dune chain. These sandy accumulations host a phreatic aquifer with waters of good physical and chemical quality, which is the main source of water supply for the populations of the area. The present work aims to determine the hydrodynamic characteristics of this aquifer, drawing a piezometric and isopaquic map of the unsaturated zone using specific software. With these maps we were able to identify the phreatic morphology, the direction of groundwater flow and its velocity, in addition to calculating the hydraulic gradients. As a result, it was possible to determine that the groundwater flow direction in the area broadly follows the slope of the terrain, with the highest piezometric levels tending to be located in the southeastern portion of the dune chain, while the lowest piezometric levels are located in the northwestern portion. The average hydraulic gradient is around 3 ‰, while the effective groundwater velocity averages 0,26 m/d. The greatest thicknesses of the unsaturated zone are recorded in the southeast of the chain, coinciding with the highest topographic elevations. In 90% of the area considered, it does not exceed 8 m. Knowledge of the phreatimetry and hydrodynamics of an aquifer provides fundamental information for understanding its functioning, which is necessary for the rational and sustainable management of water resources.

**Keywords:** groundwater, dune chain, hydraulics.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El agua es un bien de vital importancia para el desarrollo económico, social y productivo de la población, más aún en regiones de clima semiárido, donde la oferta de agua es fuertemente dependiente de las precipitaciones. En la provincia de Buenos Aires, y particularmente en el sudoeste bonaerense, gran parte de pueblos y ciudades se abastecen de agua subterránea (Kruse, 2015).

En la parte septentrional del partido de Villarino se ubica un cordón medanoso que aloja un acuífero freático con aguas de buena calidad fisicoquímica, que es además la principal fuente de abastecimiento para los habitantes del lugar. Estas acumulaciones arenosas se encuentran en general cubriendo a los depósitos más finos de las formaciones Río Negro y Chasicó. Esta variación litológica de los sedimentos y las diferencias fisicoquímicas del agua subterránea, resultan en una estratificación hidroquímica, con una lente de agua de

baja salinidad contenida en los depósitos arenosos que descansa sobre una más salobre y extensa. Teniendo en cuenta esto, contar con información acerca de la hidrodinámica en el sector toma especial relevancia para la gestión racional y sustentable del recurso hídrico.

Atendiendo a esto, se llevaron a cabo campañas de campo para la realización de un censo de puntos de agua. Posteriormente, con los datos freáticos, mediante el software Surfer 15 se confeccionaron los mapas piezométricos y se determinaron las características hidrodinámicas del acuífero freático contenido en el cordón de dunas. De esta manera, el objetivo de este trabajo es determinar las características hidrodinámicas de dicho acuífero: la dirección de movimiento del agua subterránea, gradiente hidráulico y velocidad de movimiento, así como también identificar la morfología freática del mismo y espesor de la zona no saturada.

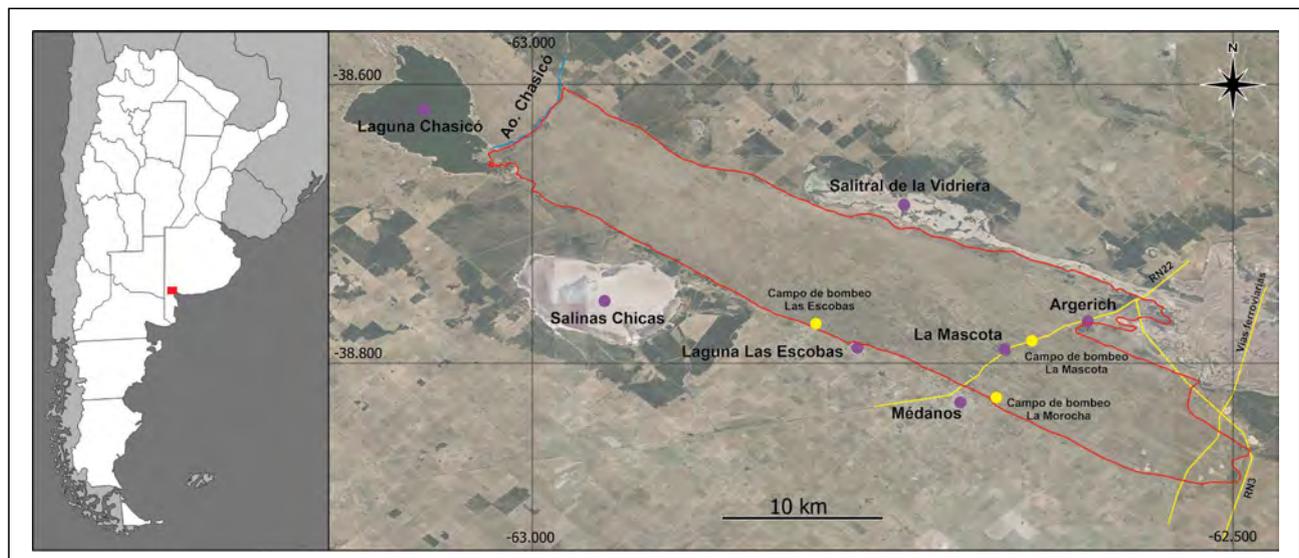


Figura 1. Ubicación del área de estudio, delimitada en rojo.

## CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio (Figura 1) se encuentra en la porción septentrional del Partido de Villarino, al sudoeste de la Provincia de Buenos Aires. Su centro aproximado se ubica en las coordenadas 38°44'32" de latitud Sur y 62°45'24" de longitud Oeste. Se enmarca a nivel regional dentro de la llanura bonaerense y abarca la cadena de dunas que se extiende unos 50 km en dirección noroeste-sudeste, desde el estuario de Bahía Blanca, al sudeste, hasta la laguna Chasicó y el arroyo homónimo al noroeste. Hacia el noreste limita parcialmente con el salitral de la Vidriera y hacia el suroeste con las Salinas Chicas. Su porción sudeste posee una suave pendiente de 0,2 % hacia el NE y una altura media de 30 m.s.n.m. (Carrica et al., 2012), mientras que el sector noroeste de la cadena tiene una pendiente promedio de 0,5% hacia el SO, con una altura media de 3 m por debajo del nivel del mar.

El clima de la zona es de características subhúmedas a semiáridas. Según los índices climáticos de Thornthwaite (1948) clasifica como C1 B'2 d a', (subhúmedo, mesotermal templado frío, con un nulo o pequeño exceso de agua y una eficiencia térmica menor al 48%), limitando al sur con el sector semiárido (D B'1 d a') (Sánchez et al., 1998).

De acuerdo a Bonorino (1979), la temperatura media anual es de 14,2 °C, con extremos medios en enero y julio

de 22,5 °C y 7 °C, respectivamente. Las precipitaciones (serie 1972-2005 de Médanos) son de un promedio de 546,8 mm/año, con un mínimo en el mes de junio de 20,8 mm y un máximo en marzo de 78,2 mm.

Sobre la cadena de dunas se ubican tres campos de bombeo de la prestataria de agua local, denominados Las Escobas, La Mascota y La Morocha. El primero de estos se encuentra ubicado al oeste de la laguna Las Escobas, sobre el borde sudoeste de los médanos. El campo de bombeo La Mascota se ubica en proximidades de la Ruta Nacional 22, entre la localidad homónima y Argerich. Por último, el campo de bombeo La Morocha se emplaza unos 2 km al este de la ciudad de Médanos.

## GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

La geología del sector, a los fines prácticos de este estudio, puede simplificarse de la siguiente forma: al inicio de la secuencia se encuentran los depósitos de la Fm. Chasicó (Pascual, 1961), conformada mayormente por sedimentos limo-arcillosos rojizos de origen continental. Suprayaciendo a estos se encuentran en ocasiones las areniscas fluviales de la Fm. Río Negro (Andreis, 1965). Ambas unidades son de edad Pliocena. Suprayaciendo lo anterior, de manera

FORMACIÓN	LITOLOGÍA	PROPIEDADES ACUÍFERAS
Médanos (Holoceno)	Depósitos eólicos integrados por arenas medianas a finas, en forma de mantos o cuerpos medanosos. Yacen sobre los Limos Loessoides, la Formación Río Negro o los Rodados Patagónicos	Nivel freático a poca profundidad. Agua en espacios porosos. Alta porosidad y buena permeabilidad. Agua de bajo contenido en sales. (3 m de espesor medio)
Rodados Patagónicos (Pleistoceno)	Gravas medianas a finas con matriz arenosa, de origen fluvial, desarrolladas preferentemente al Sur del río Colorado, fuertemente cementadas por carbonato de calcio en los términos superiores. Apoyan sobre la Formación Río Negro y en algunos sectores sobre los Limos Loessoides	El nivel superior actúa como una capa de permeabilidad por fisuración a través de la cual se infiltra el agua de lluvia. No forma acuíferos (entre 2-4 m de espesor)
Formación Río Negro o Rionegrense (Plioceno)	Arenisca de grano medio a fino, color gris, estratificación entrecruzada.	Buenas porosidad y permeabilidad. Acuíferos de rendimiento variable. Aguas de mediana a alta mineralización. (espesores saturados entre 4-9 m)
Limos Loessoides También denominados Formación Chasicó (Plioceno inferior)	Limos arcillosos de color castaño rojizo, macizos, con intercalaciones de arenas y arcillas y niveles calcáreos y yesíferos	Baja porosidad y permeabilidad. Es portadora de niveles acuíferos de carácter confinado aproximadamente entre los 50 y 200 m de profundidad. (entre 150 y 200 m de profundidad)

Figura 2. Esquema hidroestratigráfico para el área de estudio según Lexow y Bonorino (2012), detallando las propiedades acuíferas y espesores saturados de cada unidad.

discontinua, se puede encontrar ocasionalmente una capa de conglomerados de unos pocos metros de espesor, designada informalmente como “Rodados Patagónicos” (Fidalgo, 1999), de edad Pleistocena. Apoyando en discordancia sobre los depósitos ya mencionados se encuentran las acumulaciones eólicas que conforman la cadena de médanos del área de estudio. Se trata de arenas eólicas de edad Holocena y reciben diferentes denominaciones dependiendo del autor: “Arenas Médanos” (Spaletti e Isla, 2003), Formación Estancia La Aurora (Fidalgo et al., 1987), Formación La Postrera o Formación Médanos (Bonorino, 1974). Son de características similares y comparables a las acumulaciones medanosas presentes en la provincia de La Pampa. Estos depósitos, de diseño de grano unimodal, tienen una potencia en general que ronda los 15 m, pudiendo duplicar su espesor en áreas puntuales. Están compuestas por arenas finas a medias, en ocasiones muy finas, que tienden a disminuir levemente su granulometría hacia el noroeste de la cadena. Se componen principalmente de cuarzo, plagioclasas, microclino, piroxeno, epidoto, magnetita titanífera y no poseen carbonato de calcio (Bonorino, 1979). Rossetto (1953) llevó a cabo un estudio detallado de su granulometría y mineralogía atribuyéndole una componente piroclástica.

En cuanto a la hidrogeología, el área se enmarca dentro de la Región Hidrogeológica de la cuenca de Bahía Blanca, según propone Auge (2004). El acuífero freático objeto de este estudio se encuentra contenido en el cordón medanoso antes mencionado y tiene un espesor saturado variable que en promedio ronda unos 3 m (Bonorino, 1979), superando en sectores puntuales los 30 m (relacionado a cuestiones geomorfológicas). En lo que respecta a la calidad del agua, es dulce, con conductividades eléctricas, en general, entre los 400 y 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este acuífero se encuentra sobreyaciendo y conectado hidráulicamente a los contenidos en las Formaciones Río Negro y Chasicó. El agua subterránea en estas dos últimas unidades posee en general una mayor mineralización, con conductividades que suelen superar los 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y contenidos importantes de oligoelementos, tales como el F y el As. Por debajo de los 50 m de profundidad pueden encontrarse niveles acuíferos semiconfinados-confinados, con aguas salinizadas naturalmente.

Basándose en investigaciones previas (Bonorino, 1974, 1979; Albouy, 2005) y sondeos eléctricos verticales llevados a cabo en la zona, Lexow y Bonorino (2012) determinaron el

esquema hidroestratigráfico del sector (Figura 2).

Estos mismos autores, detectaron un incremento apreciable de la salinidad en profundidad y propusieron la existencia de una lente de agua de baja salinidad que descansa sobre una más salobre y extensa. De esta manera, tendría lugar una estratificación hidroquímica dentro del sistema, con una zona de transición, debido a la diferencia de densidad de los fluidos, donde el mayor espesor de agua dulce se encuentra en el centro de la cadena medanosa, disminuyendo lateralmente (Figura 3).

Las características litológicas del cordón de dunas, le confieren una alta capacidad de infiltración, impidiendo el desarrollo de una red de drenaje definida. De esta manera, el agua de las precipitaciones es incorporada rápidamente a la zona saturada como recarga del sistema.

## METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se basó en la recopilación de información antecedente de la zona. Posteriormente se realizaron sucesivas salidas al campo para llevar a cabo un censo de puntos de agua, mapeando y midiendo tanto ojos de agua (afloramientos del nivel freático) como perforaciones, totalizando 40 mediciones. La cota topográfica de cada punto, utilizada para el cálculo del nivel piezométrico, fue obtenida a partir del modelo digital de elevación MDE-Ar 2.0 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para la medición de niveles se utilizaron sondas piezométricas OTT de 50 m y Solinst 102M de 25 m. Las coordenadas de cada punto medido se tomaron mediante un GPS Garmin eTrex 30X.

Con estos datos, se generó el mapa de isopiezas con el software Surfer 15. El algoritmo de interpolación escogido para la generación de isolíneas fue “Natural Neighbour” (vecino natural), que mostró los mejores resultados en relación a los restantes disponibles. Adicionalmente, mediante el mismo software, se generó una imagen de la superficie freática en 3D. Conjuntamente con esto se confeccionó un mapa isopáquico de la ZNS del área de estudio. Todos los mapas resultantes fueron modificados manualmente para introducirle mejoras utilizando criterio geológico e hidrogeológico.

De acuerdo a las variaciones en las características piezométricas del área de estudio, se dividió la misma en tres

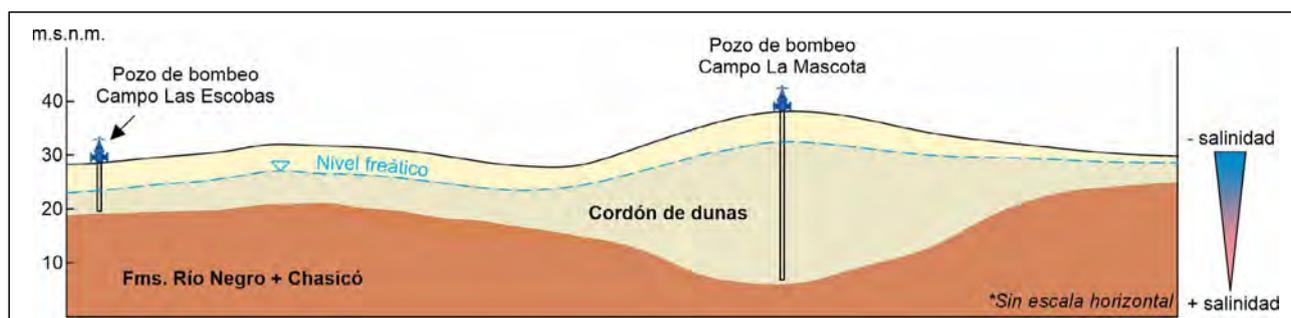


Figura 3. Corte representativo (sin escala horizontal) del sistema acuífero estudiado.

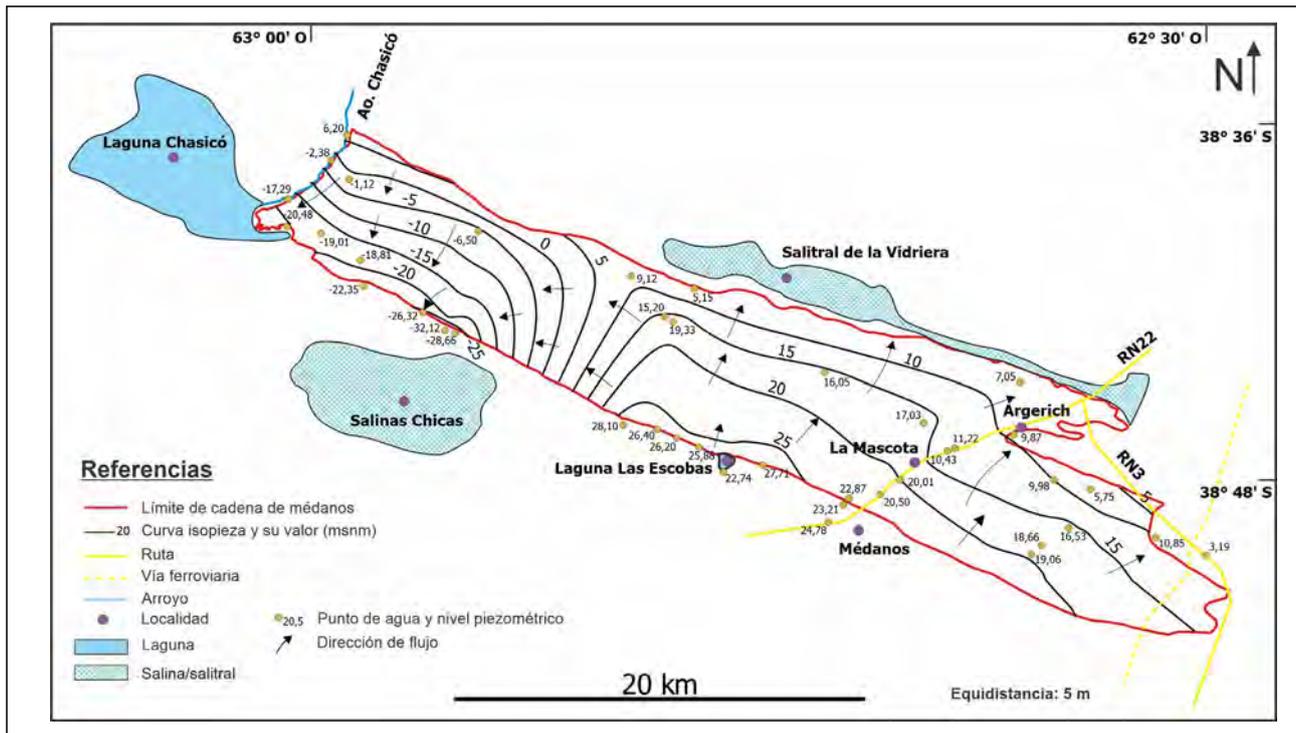


Figura 4. Mapa de isopiezas de flujo regional del acuífero freático medanoso en el área de estudio. Los flujos radiales de corto recorrido no fueron representados en esta figura.

sectores y se calcularon separadamente en cada uno de ellos los gradientes hidráulicos máximos, mínimos y promedios, como así también la velocidad efectiva del agua subterránea en cada caso.

## RESULTADOS

En base al mapa de isopiezas realizado (Figura 4), se pudo definir la dirección de flujo del agua subterránea contenida en el acuífero arenoso en la zona, la cual sigue a grandes rasgos la inclinación del terreno. Localmente se presentan flujos radiales cortos de descarga en las áreas de interduna (superpuestos a aquellos más profundos y de mayor recorrido), condicionados por la morfología, dando lugar en ocasiones a bajos inundados que conforman humedales de escasa expresión superficial. De esta manera, se pueden identificar dos sistemas de flujo: uno somero, de tipo local, con recorridos cortos, y otro más profundo que el anterior, de carácter regional y recorridos más extensos.

En el modelo 3D generado (Figura 5) se puede apreciar, a simple vista, que los mayores niveles piezométricos tienden a ubicarse en la porción sudeste del cordón de dunas, mientras que las cotas piezométricas más bajas se ubican en la porción noroeste.

Como se mencionó anteriormente, el área fue subdividida en tres sectores para analizar independientemente sus características piezométricas e hidráulicas (Figura 6): en la parte este del área de estudio (sector A), el agua subterránea sigue una dirección SO-NE, hacia el bajo del Salitral de la

Vidriera, el cual actúa naturalmente como área de descarga. El gradiente hidráulico tiene máximos de 3,2 ‰ y mínimos de 1,4 ‰, con el gradiente promedio ubicándose en 2 ‰.

Considerando un valor de conductividad hidráulica de 17 m/d y una porosidad eficaz de 20% (Bonorino, 1979) para los sedimentos arenosos, la velocidad efectiva del agua subterránea varía entre 0,27 y 0,12 m/d, con un promedio de 0,17 m/d. Estos parámetros solo corresponden al acuífero contenido en las arenas, ya que los sedimentos subyacentes al cordón de dunas poseen características hidráulicas diferentes.

A lo largo del trayecto que atraviesa la Ruta Nacional 22, entre localidades de Médanos, La Mascota y Argerich, se puede observar una inflexión en las curvas isopiezas. Su presencia podría asociarse a una profundización en los niveles vinculada al bombeo de agua subterránea mediante las numerosas obras de captación existentes en el sector, que aglomera casi la totalidad de los habitantes del área de estudio considerada. El mismo efecto se observa en la curva equipotencial de 25 m.s.n.m., al oeste de la Laguna Las Escobas, producto del campo de bombeo homónimo. En el campo de bombeo La Morocha no fue posible realizar mediciones de nivel, debido a que todos los pozos se encuentran tapados y cerrados, por lo que no se cuenta con información de la piezometría en detalle de esa porción del área de estudio en particular. La Laguna Las Escobas corresponde a una depresión local, la cual recibiría aguas del flujo proveniente de la llanura circundante. Los flujos subterráneos de carácter local que podrían intersectarla no se encuentran graficados en el mapa debido a la escala del mismo.

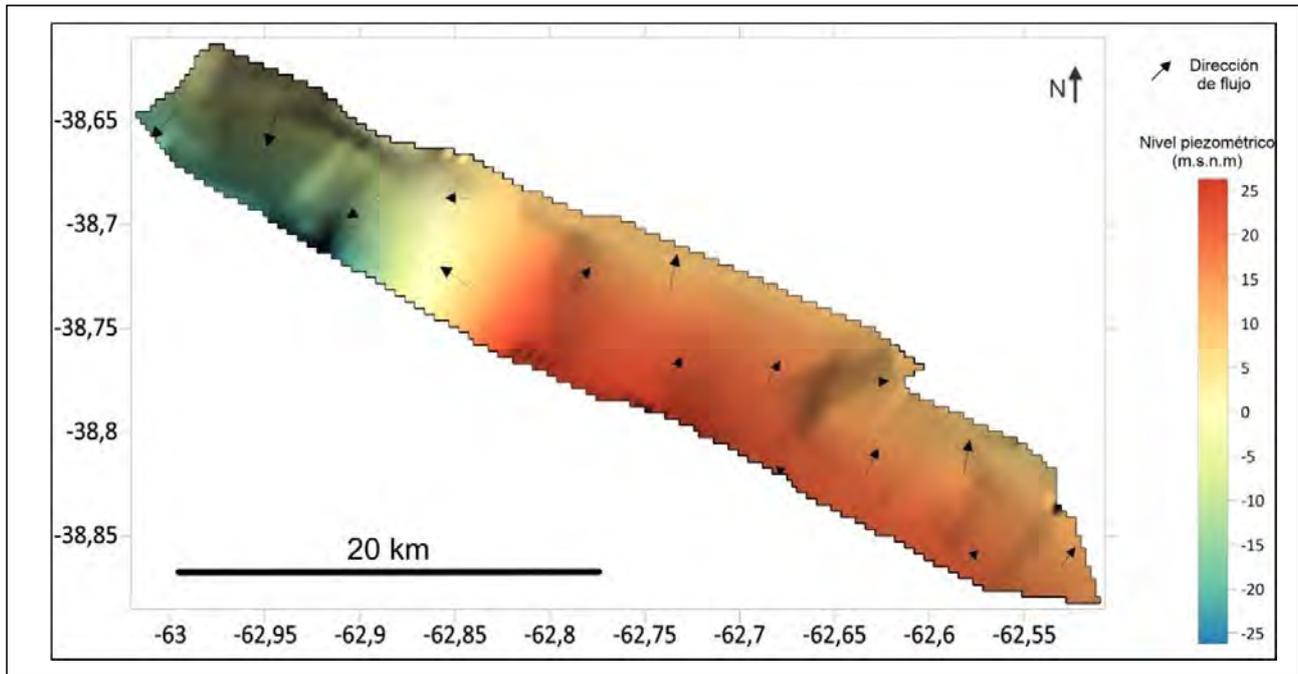


Figura 5. Superficie freática y líneas de flujo, generados mediante el software Surfer.

En la porción oeste de la zona de estudio (sector C), solo con población rural dispersa, el flujo sigue una dirección NE-SO, descargando parcialmente hacia las Salinas Chicas y Laguna Chasicó. El gradiente hidráulico es mayor que en el caso anterior (producto de un mayor desnivel topográfico), con máximos de 13 ‰ y mínimos de 2,8 ‰, con un valor promedio que se ubica en el orden de 3,5 ‰. Considerando los mismos parámetros utilizados con anterioridad, la velocidad efectiva del agua subterránea varía entre 1,1 y 0,24 m/d, con un promedio de 0,3 m/d.

El cambio en el sentido del flujo entre los dos sectores descriptos, se da aproximadamente en el centro de la cadena de médanos (indicado como sector B), posiblemente relacionado a las características topográficas allí presentes. La dirección general de flujo es ESE-ONO. El gradiente hidráulico se ubica entre 3,9 y 3 ‰, con un valor promedio de alrededor de 3,6 ‰. La velocidad efectiva del agua subterránea varía entre 0,33 y 0,26 m/d, con un promedio de 0,31 m/d.

Todos los valores calculados (sintetizados en la Tabla 1) se encuentran dentro del orden de magnitud lógico para el tipo de acuífero tratado.

En lo que respecta al espesor de la zona no saturada (ZNS), el mismo varía en general entre los 12 y los 2,5 m (Figura 7). Los mayores espesores se registran en el sudeste de la cadena de dunas, coincidente con las mayores cotas topográficas, y principalmente en los alrededores de la localidad de Médanos. Posiblemente, estén influenciados por las numerosas captaciones en el núcleo urbano que deprimen la capa freática.

El efecto producido por los campos de bombeo sobre el nivel freático se observa al analizar el mapa isopáquico de la ZNS, donde las isolíneas de 8 m son alteradas debido al

bombeo existente en las cercanías de La Mascota y oeste de la Laguna Las Escobas. Como se mencionó anteriormente, en el campo de bombeo La Morocha no fue posible realizar mediciones de nivel, por lo que no se cuenta con información en detalle de la freaticimetría de esa porción de zona.

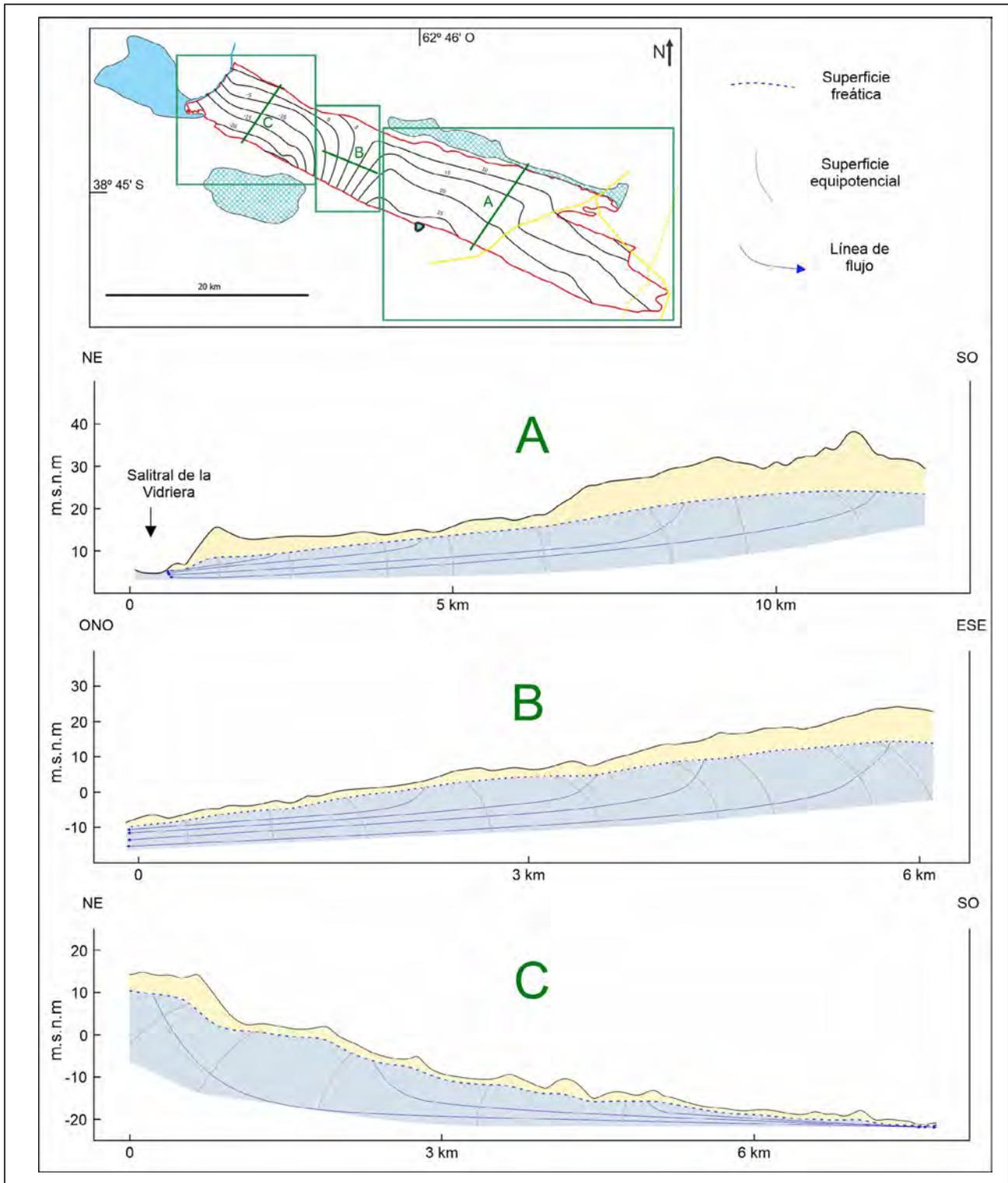
Los menores espesores de la ZNS se ubican mayormente en el sector noroeste de la cadena. El área ocupada por cada intervalo de espesor de ZNS considerado en el mapa se muestra en la Tabla 2.

Tabla 1. Valores de gradiente y velocidad del agua subterránea para los tres sectores considerados.

	Sector A	Sector B	Sector C	
Gradiente hidráulico (‰)	Máximo	3,2	3,9	13
	Mínimo	1,5	3,0	2,8
	Promedio	2,0	3,6	3,5
Velocidad efectiva del agua subterránea (m/d)	Máximo	0,27	0,33	1,1
	Mínimo	0,12	0,26	0,24
	Promedio	0,17	0,31	0,3

Tabla 2. Área de la zona de estudio ocupada por cada intervalo de espesor de ZNS considerado en el mapa isopáquico.

Espesor de ZNS	Área ocupada (km²)	Porcentaje del total del área de estudio
< 4 m	220,48	50,41 %
4-8 m	173,85	39,75%
8-12 m	43	9,83%
>12 m	0,05	0,01 %



**Figura 6.** Sectores del área de estudio divididos de acuerdo a sus características piezométricas y cortes esquemáticos del acuífero psamítico de cada uno. La escala no permite apreciar los flujos locales de descarga interduna mencionados en el texto.

Como puede observarse, en la mayor parte del área de estudio (50,41 %), el espesor de la ZNS no llega a superar los 4 m, mientras que en la amplia mayoría de la misma (90 %) no llega a superar los 8 m.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que la dirección de flujo del agua subterránea en el área de estudio sigue a grandes rasgos la superficie del terreno.

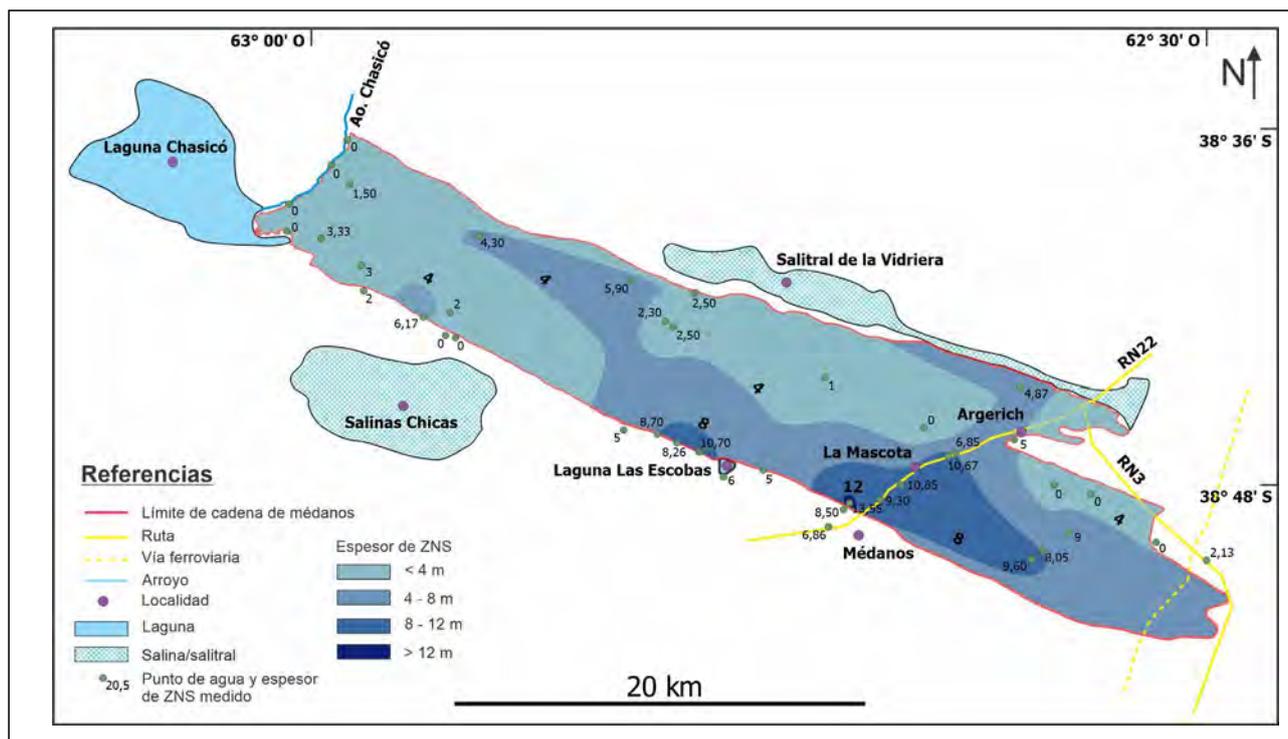


Figura 7. Mapa isopáquico de la zona no saturada del área de estudio.

El gradiente hidráulico promedio se encuentra en torno al 3 %, con un máximo de 13 % y un mínimo de 1,5 %. Los mayores valores corresponden a la porción oeste de la cadena medanosa, producto de una mayor topografía en dicho sector. La velocidad efectiva del agua subterránea tiene un promedio de 0,26 m/d, con un máximo de 1,1 m/d y un mínimo de 0,12 m/d.

Los bajos del Salitral de la Vidriera, Salinas Chicas y la Laguna Chasicó actúan como áreas de descarga del acuífero. Ciertas porciones del acuífero se ven afectadas por campos de bombeo de la prestataria del servicio de agua local, ubicados sobre la cadena de dunas.

Los mayores espesores de la ZNS se registran en el sudeste de la cadena, coincidente con las mayores cotas topográficas. En un 90% del área considerada, el mismo no supera los 8 m.

El conocimiento de la freaticimetría e hidrodinámica de un área es de gran importancia en cualquier estudio hidro-

geológico y permite obtener información fundamental para la comprensión del funcionamiento de un acuífero, necesaria para la gestión racional y sustentable del recurso hídrico.

### CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Matías Rey; Metodología: Matías Rey y Andrés Gabriel Ruffo; Análisis de datos: Matías Rey y Andrés Gabriel Ruffo; Redacción - preparación del borrador original: Matías Rey; Redacción - revisión y edición: Matías Rey, Andrés Gabriel Ruffo, René Albouy y Juan Manuel Giorgi. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

### DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albouy, R. (2005). Estudio hidrogeológico expeditivo en proximidades de la localidad de Argerich, provincia de Buenos Aires. *Informe FUNSA, 7 pp.* (Inédito).

Andreis, R. (1965). Petrografía y paleocorrientes de la Formación Rio Negro. *Revista Museo de la Plata, Nueva Serie, 5*, 245-310.

Auge, M. (2004). *Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe.* Edición del autor.

- Bonorino, A.G. (1974). Contribución al conocimiento de las aguas subterráneas de la zona de Médanos, partido de Villarino (Provincia de Buenos Aires). *C.I.C. de la provincia de Buenos Aires. La Plata*. (Inédito).
- Bonorino, A.G. (1979). Estudio hidrogeológico para la provisión de agua subterránea en la zona de Médanos, partido de Villarino, provincia de Buenos Aires. *VI congreso Geológico Argentino. Actas* 443-465.
- Carrica, J.C., Lexow, C. y Bonorino, A.G. (2012). La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, Prov. de Buenos Aires, Argentina. *XI Congreso latinoamericano de Hidrogeología*. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias en CD.
- Fidalgo, F. (1999). El Cuaternario de la provincia de Buenos Aires. En: Caminos, R. (Ed): *Geología Argentina*, SEGEMAR, Anales 29: 700- 703, Buenos Aires.
- Fidalgo, F., Tonni, E., Porro, N. y Laza, J. (1987). Geología del área de la Laguna Chasicó (Partido de Villarino, Provincia de Buenos Aires) y aspectos bioestratigráficos relacionados. *Asociación Geológica Argentina. Revista* 42 (3-4), 407-416.
- Kruse, E. (2015). Uso del agua subterránea y desarrollo sustentable. *Núcleos*, 2 (8), 30-36.
- Lexow, C. y Bonorino, A.G. (2012). Estudio hidrogeológico de Médanos. *Informe FUNS para ABSA*. (Inédito).
- Pascual, R. (1961). Un Nuevo Cardiomyinae (Rodentia, Caviidae) de la Formación Arroyo Chasicó (Plioceno inferior) de la provincia de Buenos Aires. *Ameghiniana* 2 (4), 57-71.
- Rossetto, H.L. (1953). *Contribución al conocimiento psamográfico de los médanos de la zona oriental del partido de Villarino, Pcia. de Buenos Aires*. Tesis doctoral (inédita). Museo de Ciencias Naturales de La Plata.
- Sánchez, R., Pezzola, N. y Cepeda, J. (1998). Caracterización edafoclimática del área de influencia del INTA E.E.A. Hilario Ascasubi, Partidos de Villarino y Patagones, provincia de Buenos Aires. *Boletín de divulgación* N° 18. INTA Hilario Ascasubi. 72 pp. (Inédito).
- Spaletti L. e Isla, F. (2003). Características y Evolución del Delta del Río Colorado (“Colú- Leuvú”) Prov. de Buenos Aires, República Argentina. *AAS (Asociación Argentina de Sedimentología). Revista*. 10 (1), 23-37.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev.* (38), 55-94. <http://dx.doi.org/10.2307/210739>

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>  
Catinari, J.M., Gatica, J.R., Bassani, S.A., Navarro, J.S., Aires, A.N. y Fernández, C.L.  
Evaluación de estabilidad estructural de la caverna Arenal, Área Natural Protegida Cuchillo Curá, Neuquén  
e010, <https://doi.org/10.59069/24225703e010>

# Evaluación de estabilidad estructural de la caverna Arenal, Área Natural Protegida Cuchillo Curá, Neuquén

## Structural stability assessment of the Arenal cavern, Cuchillo Curá Protected Natural Area, Neuquén

 Juan Matías Catinari<sup>1\*</sup>   José Ricardo Gatica<sup>1</sup>   Santiago Andrés Bassani<sup>2</sup>   
 Joaquín Salvador Navarro<sup>1</sup>   Axel Nicolás Aires<sup>1</sup>   Camila Ludmila Fernández<sup>1</sup> 

\* Contacto

Recibido: 16 de junio de 2023 • Aceptado: 9 de agosto de 2023 • Publicado: 15 de agosto de 2023

### Resumen

El ANPCC (Área Natural Protegida Cuchillo Curá) contiene actualmente al sistema cavernario más extenso de Argentina, con más de 5 kilómetros de extensión conformado por las cavernas Arenal, Templo, Gendarme y Cabritos.

La estabilidad estructural de las mismas es poco conocida y es motivación de este trabajo aportar con estudios que desarrollen la temática. A tal fin, se emplearon dos metodologías específicas de análisis de susceptibilidad en sistemas cavernarios, aplicables tanto en cavernas de origen kárstico o volcánico: el Índice Geotécnico de Cavernas (*Brandt et al., 2020*) y el Índice Q adaptado por *Jordá-Bordehore (2017)*. Ambas clasificaciones fueron aplicadas para estudiar particularmente un sector de la caverna Arenal, dejando el resto del sistema cavernario para próximos estudios en la medida que sea requerido por el Ministerio de las Culturas de la provincia del Neuquén. La resultante sectorización del tramo estudiado fue caracterizada en función de estas clasificaciones, ofreciendo mapas de susceptibilidad a la inestabilidad estructural. Si bien cada una de estas clasificaciones fue diseñada en forma independiente, la aplicación de ambas nos permitió comparar sus resultados y tomar experiencia en el uso de cada una de ellas, lo cual será un gran aporte para decidir cómo continuar la evaluación de estabilidad del resto del Sistema Cavernario Cuchillo Curá.

En función de las observaciones en campo y los estudios geotécnicos desarrollados, se determinó que la caverna Arenal está contenida en un macizo rocoso de calidad mala a buena (RMR), afectada por discontinuidades sistemáticas y, particularmente, un nivel arcilloso que, por sus características expansivas, geométricas y de reducida resistencia, es considerado como el factor condicionante que más influye en la inestabilidad de la misma.

**Palabras clave:** IGC - índice Q - susceptibilidad cavernaria - arcillas expansivas.

1 Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Departamento de Geología y Petróleo. Neuquén, Argentina.

2 Ministerio de las Culturas del Neuquén-Dirección Provincial de Patrimonio Cultural-Depto Espeleología

## Abstract

The ANPCC currently contains the most extensive cave system in Argentina, with more than 5 kilometers extension represented by Arenal, Templo, Gendarme and Cabritos caverns.

The structural stability of these is undeveloped and the motivation of this work is to contribute with studies to the subject. To achieve this particular aim, two specific susceptibility analysis methodologies in cave systems were used, applying both in caves of karstic or volcanic origin, developed in recent years: The Geotechnical Cave Index (*Brandi et al., 2020*) and the Q Index, adapted by *Jordá-Bordehore (2017)*. Both classifications were applied to study a particular sector of the Arenal cave, leaving the rest of the cave system for future studies as required by the Ministry of Cultures of the province of Neuquén. The resulting zonation of the section studied was characterized based on these classifications, acquiring susceptibility to structural instability maps. Although each of the two classifications has been designed independently, the application of both showed us to compare their results and gain experience in the use of each of them, which will be a great contribution to decide how to continue the stability evaluation of the rest of the Cuchillo Curá Cave System.

Based on the in-field observations and the geotechnical studies carried out, it was determined that the Arenal cavern is contained in a poor to good (RMR) rock mass quality, affected by systematic discontinuities and, particularly, a clayey level that, due to its expansive, geometric and low resistance characteristics, it is considered as the most determining factor that influences its instability.

**Keywords:** cave susceptibility - expansive clays – GCI - Q index.

## INTRODUCCIÓN

En la provincia del Neuquén, el cuidado del patrimonio espeleológico se rige con la Ley 2213/97 (“Régimen de Promoción, Protección y Conservación de la Espeleología”) cuya autoridad de aplicación es el Ministerio de las Culturas. A raíz de su importancia espeleológica se creó el ANPCC mediante decreto N° 161/2003 de la provincia del Neuquén, con el objetivo de preservación del sistema cavernario que aloja, considerado, al momento, el de mayor desarrollo del país (más de 5 kilómetros), distribuidos en cuatro cavernas alineadas consecutivamente de oeste a este: Arenal (1.299,50 metros), Templo (1.931,50 metros), Gendarme (1.691,18 metros) y Cabritos (83,10 metros). Entre ellas, las cavernas Arenal y Gendarme fueron motivo del informe de *Catinari et al., (2022)*, del cual se toma información para la presente publicación, en la cual se volcará un análisis geotécnico de estabilidad en la primera de las cavernas mencionadas.

El ingreso a estas cavernas conlleva un riesgo poco conocido relacionado a la peligrosidad de caída de bloques y desplomes del techo. La caída de rocas en un ambiente subterráneo es un proceso continuo en el tiempo que se desarrolla hasta alcanzar un estado de equilibrio, por lo que no se debe tomar como eventos únicos y aislados. Es decir, que la presencia de bloques caídos en el piso de una galería, un salón u otro ambiente espeleológico, indica un proceso gravitacional que probablemente continúe activo. Generalmente las caídas, desplomes o colapsos están asociados a factores condicionantes y desencadenantes. Entre los primeros, vale mencionar a aquellos relacionados con el tipo de material asociado (litología), las discontinuidades presentes (diaclasas, fallas, estratificación, etc.), la presencia de agua o flujos subterráneos (hidrogeología) y las condiciones geométricas (forma del techo, espesor de roca por encima, orientación de las discontinuidades respecto al espeleotema, entre otros). Por otro lado, los factores desencadenantes pueden estar

relacionados a la geodinámica externa (erosión superficial, cargas estáticas, factores climáticos, etc.), a la geodinámica interna (sismos) o antrópicos (circulación de vehículos sobre las cavernas, sismicidad inducida por actividades cercanas, etc.).

La escasa información desarrollada para este sistema cavernario, respecto a las amenazas existentes de procesos gravitacionales, limita la posibilidad de evaluar los riesgos que significa adentrarse en las mismas para actividades de investigación y exploración entre otras.

Con el objetivo de evaluar las condiciones de estabilidad de la caverna Arenal, se llevó a cabo la actualización del estudio realizado por *Elzeard et al., (2003a y 2003b)*, considerando una serie de objetivos específicos entre los que se puede mencionar: estudio y análisis de antecedentes de la caverna Arenal; relevamiento geotécnico en campo; y la aplicación de metodologías específicas de evaluación de estabilidad en sistemas cavernarios.

## ZONA DE ESTUDIO

La caverna Arenal (38°36'44.71"S; 70°23'42.71"O) forma parte del Sistema Cavernario Cuchillo Curá, principal atractivo del ANPCC. Se encuentra a 12 kilómetros hacia el sur desde la localidad de Las Lajas, Departamento Picunches, provincia del Neuquén. Se accede desde Ruta Nacional 40, por camino interno de la Estancia La Porteña (Figura 1).

El comportamiento geomecánico de la roca huésped del sistema cavernario presenta una estrecha relación con el marco geológico y tectónico de la misma. Dentro de un contexto geológico regional, se sitúan en la faja plegada y corrida del Agrio, afectada tectónicamente durante los movimientos ándicos que elevaron la cordillera de Los Andes.

En la Hoja 35b, Zapala (*Lambert, 1956*) se puede observar que el área de estudio se emplaza dentro de un sistema estructural denominados cordones Cuchillo Curá y Curymil, junto a la sierra de la Vaca Muerta, los cuales conforman un gran pliegue referido inicialmente como anticlinal de la Sierra de Vaca Muerta. El sistema cavernario fue desarrollado en el limbo norte de dicho pliegue y vinculado a la Formación La Manga como unidad hospedante de los procesos kársticos (*Elzeard, 1987; Anghilante et al., 1990*).

## ANTECEDENTES

Los trabajos de *Elzeard et al., (2003a y 2003b)* y *Catinari et al., (2022)* son considerados como únicos antecedentes de estudios geotécnicos encontrados para las cavernas Arenal y Gendarme. En el primero, se considera a ambas cavernas en un estado evolutivo senil, con procesos kársticos que ya no

están vigentes y que actualmente atraviesan una lenta evolución gobernada principalmente por procesos gravitacionales que dependen en gran medida de las propiedades mecánicas del macizo rocoso y cuya evolución hace que la geometría de las cavidades tienda hacia condiciones de estabilidad de forma natural.

De la espeleogénesis y evolución actual se mencionan procesos graviclásticos activos, controlados en gran medida por los planos de estratificación y por las diaclasas del macizo, discontinuidades que delimitan bloques que lentamente se separan del techo y paredes para finalmente caer. En forma restringida continúan procesos de disolución y reconstrucción por la infiltración de aguas de precipitación, deshielo y rocío.

Se debe considerar que, para esos tiempos, los métodos de evaluación de estabilidad de cavidades en macizos

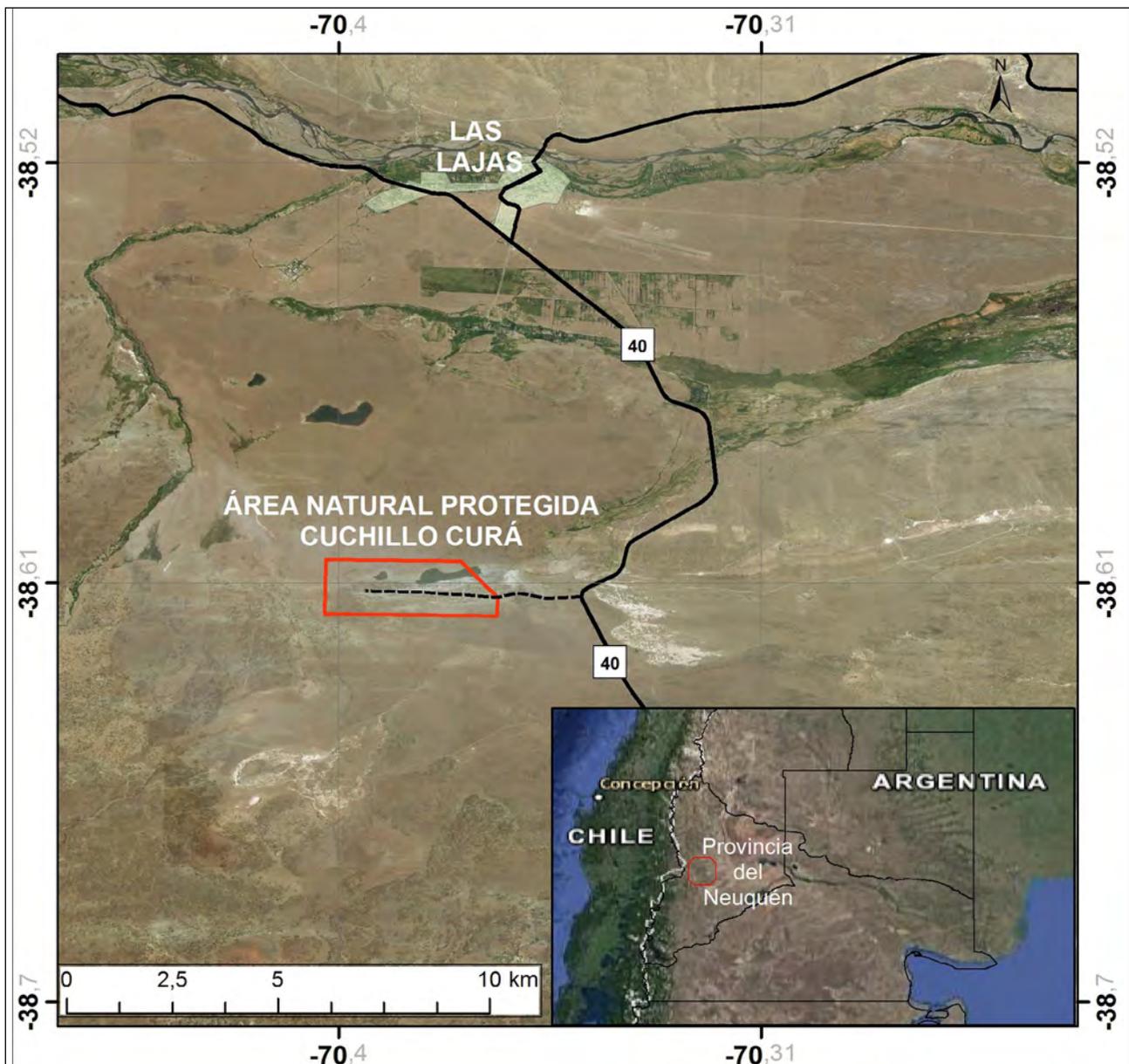


Figura 1. Mapa ubicación

rocosos habían sido desarrollados para el caso de túneles y cámaras perforadas en roca, los cuales no eran totalmente válidos o extrapolables para la evaluación de cavidades naturales. Por otro lado, los estudios de estabilidad de *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) fueron realizados considerando condiciones estáticas, es decir, sin que actúen agentes dinámicos como corrientes de agua, sismos o actividad antrópica, aunque consideran que la actividad sísmica es una de las principales causas que provocan desprendimientos de bloques, dependiendo particularmente de la intensidad del sismo.

Como criterio para definir los sectores transitables de bajo riesgo *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) consideraron, de manera cualitativa, aquellas áreas por donde se puede transitar sin quedar expuesto al riesgo por desprendimientos o caídas de bloques. Por ejemplo, para la caverna Gendarme han sugerido mantenerse del lado sur a partir de la progresiva 40 ya que se observan buenas condiciones de estabilidad.

Como antecedente importante referente a la presencia de agua, *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) describen ausencia de agua en las galerías. Sin embargo, en la década del 80 se manifestaba en varios sectores con profundidades de hasta 1 metro y a partir de la década del 90, el nivel fue descendiendo, secándose en su totalidad. Este descenso también se manifestó en la laguna de superficie, que para entonces se había reducido a la mitad de su superficie, lo que evidencia su vinculación con el nivel freático.

Entre las características geotécnicas principales *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b) describen bancos de caliza estratificada con buzamiento variable entre 22° a 28° al norte; paredes y techo de caliza gris oolítica compacta y con baja densidad de fisuración o por un banco de brecha calcárea rojiza con clastos angulosos que alcanzan los 50 centímetros de diámetro, intensamente fracturado; los planos de estratificación se comportan como discontinuidades y tienen una importante participación en la evolución actual del macizo; 5 juegos de discontinuidades en la caverna Arenal y 7 juegos en la caverna Gendarme, incluyendo la estratificación; se clasificó al macizo rocoso mediante la clasificación SCIR (Consejo de Investigación Científica e Industrial por sus siglas en inglés) obteniendo la clasificación para la caverna Arenal como un macizo de calidad regular (53 puntos considerando el ajuste de -12 puntos por orientación desfavorable de las discontinuidades). En dicho trabajo, aclaran que la clasificación empleada (SCIR) fue diseñada para la excavación de túneles y no es apropiado su empleo para evaluar el sostenimiento de cavernas naturales. Además, se realizó el relevamiento de ubicación y características de bloques inestables con la mayor concentración de estos en el nivel superior y en los accesos al nivel inferior.

## METODOLOGÍA

El relevamiento fue realizado en todos aquellos sectores que permitían el paso del equipo sin la utilización de técnicas especiales. Quedaron excluidos del estudio el sector

oriental de la caverna Arenal, por tratarse de una galería de difícil transitabilidad, y el extremo occidental. Para la actualización del estudio de estabilidad se acudió al uso de clasificaciones geotécnicas específicas para cavernas naturales, el Índice Geotécnico de Cavernas (IGC) e Índice Q, desarrolladas con posterioridad al primer trabajo de *Elzeard et al.*, (2003a y 2003b). Se explicarán ambas clasificaciones brevemente para luego clasificar cada uno de los sectores de la caverna en función de estas y poder determinar su situación de estabilidad.

### Índice Geotécnico de Cavernas

El IGC, fue propuesto por *Brandi et al.*, (2020), quienes, apoyándose en la clasificación geomecánica de *Bieniawski* (1978, 1989), clasificaron a las cuevas según su susceptibilidad a la inestabilidad estructural, considerando cuatro variables: 1) la RMR (clasificación geomecánica Rock Mass Rating) de *Bieniawski* (1989), que clasifica al macizo rocoso que contiene al sistema de cavernas; 2) el radio hidráulico (RH), variable de ingeniería que permite evaluar la dimensión del vano; 3) la forma del techo (CS), es una variable espeleológica que indica si la geometría del techo de los vanos de la cueva es favorable o desfavorable; y 4) el espesor del techo (CT), que es una variable geotécnica que representa la profundidad entre el techo de la cueva y la superficie del suelo exterior en cuanto a cuestiones de auto-soporte. Las variables RMR, RH, CT (cuantitativas) y CS (cualitativa), inducen diferentes efectos en la clasificación IGC, dependiendo de la combinación de estas variables en su ecuación ( $IGC = RMR + RH + CS + CT$ ), cuanto mayor sean los valores de RMR y CT habrá mayor contribución a una mejora del IGC, llevando la clasificación a muy baja susceptibilidad a la inestabilidad estructural. Con el RH ocurre lo contrario, cuanto mayor sea su valor, contribuirá a una peor clasificación del IGC, conduciendo a una susceptibilidad muy alta a la inestabilidad estructural. Respecto a la CS, la clasificación empeora o mejora según el tipo de forma del techo. Así, la clasificación IGC discrimina en 5 clases de susceptibilidad a la inestabilidad estructural de los vanos (Tabla 1).

La determinación del RMR fue realizada en campo, tomando descripciones de parámetros específicos requeridos para su determinación (resistencia a la compresión simple, RQD [Índice de Calidad de Roca por sus siglas en inglés: *Rock Quality Designation*], espaciamiento, características de las juntas y condiciones hidrogeológicas). Se seleccionaron distintos sitios elegidos intencionalmente según cambios observados en el macizo rocoso (estaciones geomecánicas), para relevar los parámetros recién mencionados.

Para evaluar las condiciones del CT y RH se emplearon las cartas topográficas existentes para modelar y tomar información de las mismas mediante herramientas de sistemas de información geográfica.

Particularmente para la CS, la única de las cuatro variables que se determina de manera cualitativa, se realizó una serie de secciones del relevamiento topográfico mediante la implementación de herramientas de medición láser y por in-

**Tabla 1. Peso asignado a cada clasificación y rango de clase de las cuatro variables del Índice Geotécnico de Cavernas y grado de susceptibilidad a la inestabilidad estructural en función de la sumatoria de los pesos asignados.**

VARIABLE IGC	CLASIFICACIÓN	RANGO DE CLASE	PESO
Rock Mass Rating (RMR)	Muy mala	0-20	0
	Mala	21-40	15
	Media	41-60	30
	Buena	61-80	45
	Muy Buena	81-100	60
Radio Hidráulico (RH)	Grande	1,83 - 3,00 (m)	0
	Regular	0,92 - 1,82 (m)	15
	Pequeño	0,00 - 0,91 (m)	25
Forma del Techo (CS)	Arco invertido (AI)		0
	Planar (P)		4
	Arco (A)		10
Espesor del Techo (CT)	Pequeño	0,00 - 3,31 (m)	0
	Regular	3,32 - 7,64 (m)	2
	Grande	7,65 - 10 (m)	5
Susceptibilidad a la inestabilidad estructural			IGC
MUY BAJA			IGC > 80
BAJA			60 < IGC < 80
MODERADA			40 < IGC < 60
ALTA			20 < IGC < 40
MUY ALTA			IGC < 20

interpretación visual subjetiva.

Para la asignación de valores del RMR, radio hidráulico (RH), la forma del techo (CS) y el espesor (CT), *Brandi et al., (2020)* propusieron separar en clases a cada una de las variables, asignando diferente peso a cada una (Tabla 1).

### Índice Q

Muchas de las cuevas naturales existentes, si se analizan mediante un enfoque ingenieril que suele aplicarse a excavaciones subterráneas, podrían resultar aparentemente inestables cuando se representan en gráficos empíricos, y requerirían refuerzos incompatibles con la posibilidad de ser aplicados sobre los espeleotemas. El Índice Q de *Barton et al., (1974)*, es uno de los métodos empíricos más empleados al momento de llevar adelante este tipo de excavaciones subterráneas, y no es totalmente compatible para la evaluación de cavernas naturales. Sin embargo, *Jordá-Bordehore (2017)* propone una adaptación del Índice Q contribuyendo con una curva de estabilidad (Span = 5,4 Q0,73) para las cuevas naturales, que consta de dos zonas: 1) donde se representan las cuevas estables; 2) donde se ubican las cuevas inestables o

colapsadas. Esta adaptación fue realizada en base a la evaluación de 137 cavernas (53 cavernas kársticas y 74 cavernas volcánicas).

El Índice Q, fue desarrollado por el Instituto Geotécnico de Noruega por *Barton et al., (1974)*. Este índice asigna una puntuación a cada dominio del macizo rocoso, que aumenta con la calidad de la roca. Su variación no es lineal como la RMR, sino exponencial, y oscila entre 0,001 (roca muy pobre) y 1.000 (roca muy buena). Se puede obtener en función de:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Donde RQD es la clasificación Índice de Calidad de Roca (*Deere, 1964*) determinada en campo según metodología de *Priest y Hudson (1976)*;  $J_n$  es el número de juntas de diaclasas;  $J_r$  es el número de rugosidad de las juntas;  $J_a$  es el número de alteración de las juntas;  $J_w$  es el factor de reducción de agua en las juntas; y el SRF es el factor de reducción por tensión.

Al igual que para la determinación del RMR empleada para clasificar al macizo con el IGC, se asignaron estaciones geomecánicas para el relevamiento de estos parámetros en cada sitio, además de tomar el registro de las dimensiones de las cavernas para poder entrar a la gráfica propuesta por Jorda-Bordehore (2017).

## RELEVAMIENTO GEOTÉCNICO

### Discontinuidades sistemáticas

La descripción y características de las discontinuidades sistemáticas (diaclasas y planos de estratificación convencionales), junto a la medición de otras variables que se verán a continuación, fue realizada con el objetivo de poder abordar las clasificaciones RMR (Bieniawski, 1989), IGC (Brandi et al., 2021) e Índice Q (Barton et al., 1974) que serán desarrolladas en los próximos apartados. La disposición espacial de las discontinuidades descritas en la caverna estudiada, fueron volcadas en una red estereográfica de Wulf (Figura 2), a partir de las cuales se puede observar 3 sistemas de familias predominantes, acompañadas de otras juntas.

Para la adquisición en campo de esta información se designaron estaciones de relevamiento de datos (estaciones geomecánicas) en distintos sectores del sistema hipogeo y en superficie, a fin de caracterizar al macizo rocoso en general y en sectores particulares y así tener herramientas que aporten a la zonificación del mismo y a posteriores interpretaciones.

Respecto a las características geométricas del sistema cavernario, a partir del relevamiento topográfico (Redonte et al., 2018) y análisis mediante modelado IDW (ponderación de distancia inversa por sus siglas en inglés) con herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), se obtuvo un mapa de espesor del techo (Figura 3). Además, se obtuvo el área y perímetro de cada sector para calcular el Radio Hidráulico y se buscó conocer la forma del techo en distintos puntos de las cavernas, para lo cual se realizaron secciones topográficas empleando herramientas de medición láser.

### Discontinuidades singulares

El sistema de cavernas está constituido por roca caliza. Elzeard (1987) describe 7 bancos, todos compuestos por calizas oolíticas con excepción de la brecha calcárea (banco 6). En este trabajo se agrega un nivel hallado entre el banco 5 y el banco 6, principalmente compuesto por arcillas grises, blancas y rojizas (con cierto grado de expansividad a juzgar por la presencia de grietas de desecación en el suelo de los salones y por determinaciones indirectas que serán abordadas más adelante), con espesor variable de entre escasos centímetros a sectores que podría alcanzar los 50 centímetros. Este nivel se observa tanto en superficie como en el hipogeo (Figura 4); desde el extremo oeste relevado de la caverna Arenal, hasta el sector más oriental alcanzado en la caverna Gendarme (no se ingresó a la caverna Templo para constatar su presencia ni características, pero se estiman condiciones similares a las observadas al este y al oeste de la misma).

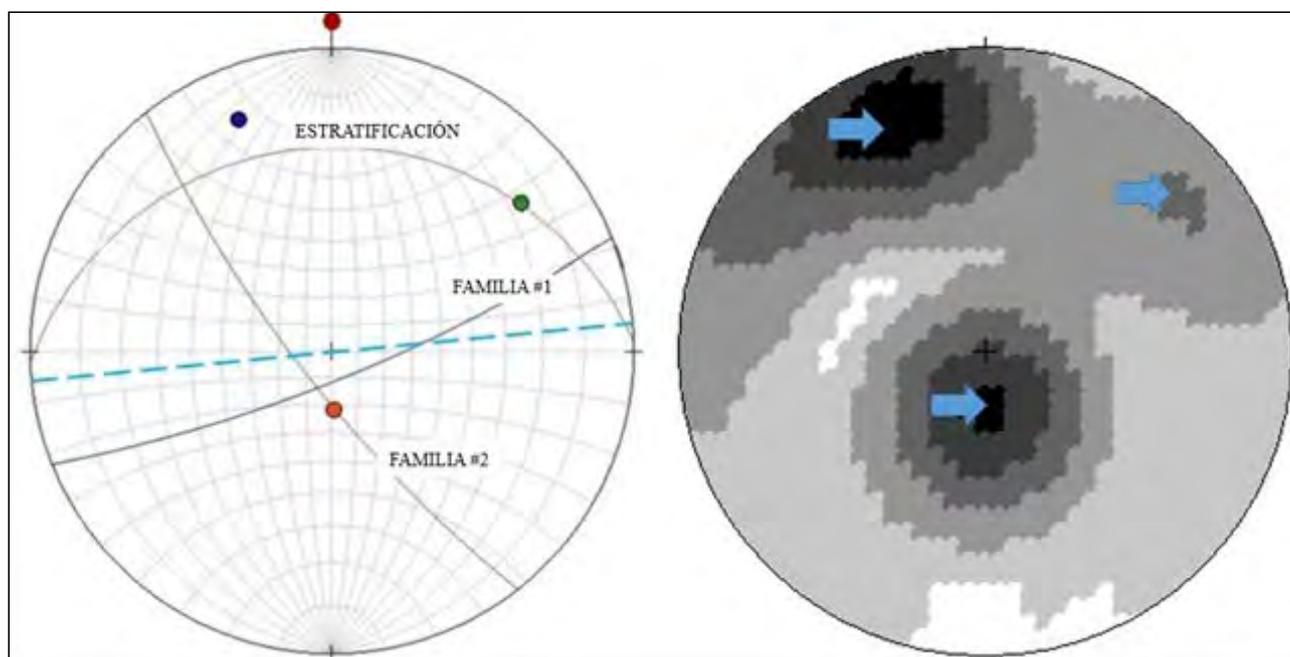
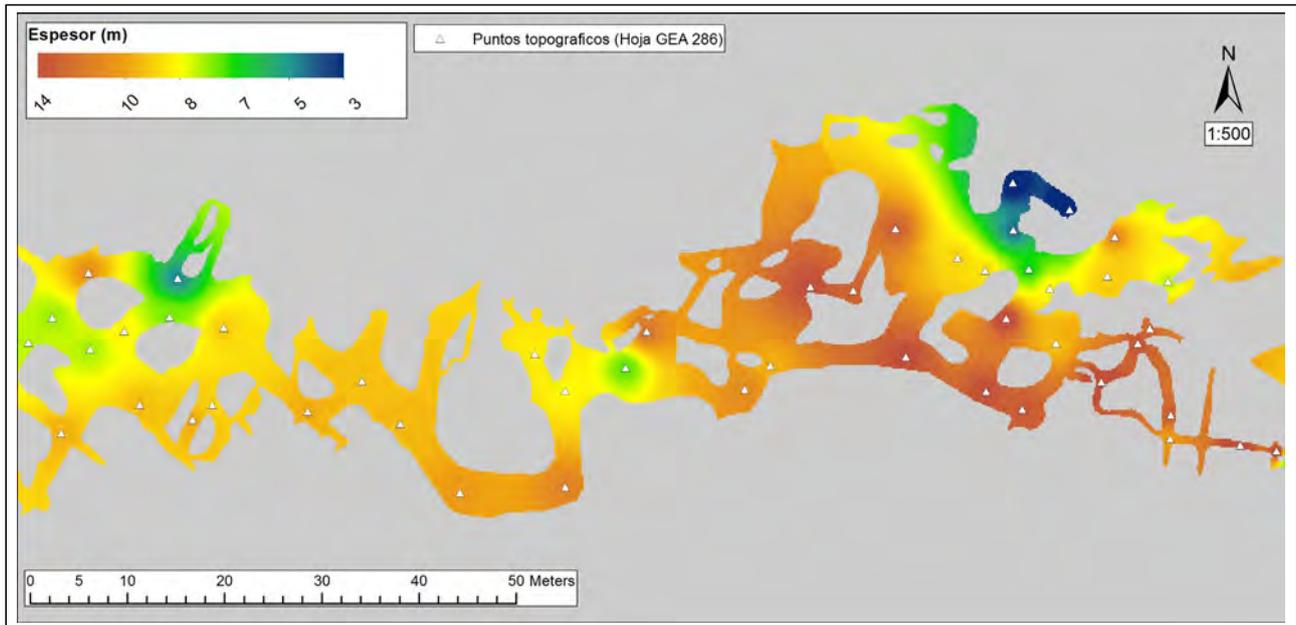


Figura 2. Izquierda: Representación de las 3 familias principales en caverna Arenal: Estratificación (rojo: Az 268°; i22° N); Familia #1 (azul: Az 68°; i79° SE); Familia #2 (verde: Az 142°; i 77° SO). A estas 3 familias de discontinuidades (estratificación incluida), acompañan otras juntas no representadas. Las familias de discontinuidades permanecen con similares comportamientos en su orientación. El círculo máximo de trazos azules representa la orientación principal del Sistema Cavernario Cuchillo Curá (rumbo general al azimut 85°). La fuerte correlación entre el rumbo de la estratificación y el sistema de cavernas sugiere que la primera controló el desarrollo de las mismas. Derecha: red estereográfica de Wulf representando diagrama de contornos de Schmidt (shadow 1%) para 40 discontinuidades de la caverna Arenal. Las flechas azules señalan las mayores concentraciones de polos.



**Figura 3. Modelado IDW del espesor del techo en cada sector de la caverna Arenal, a partir de puntos topográficos de la Hoja GEA 286 (Redonte et al., 2018).**

Este banco es uno de los factores condicionantes que más influye en la estabilidad de las cavernas Arenal y Gendarme. A juzgar por su espesor, amplia extensión y baja resistencia a la compresión simple (estimada entre 0,05 y 0,1 MPa en función de los índices de campo de *Brown, 1981*), puede ser considerado como una discontinuidad singular (en el sentido de *González de Vallejo et al., 2002*). Se observan espeleotemas de tipo coladas y estalagmitas cónicas asociadas a las superficies donde este nivel arcilloso queda expuesto dentro de galerías y salones, lo que evidencia que dicha discontinuidad constituye una vía preferente para la circulación de agua. Además, su orientación paralela a la dirección del eje principal de ambas cavernas (este-oeste) es una condición

desfavorable y se intersectan en todo el tramo recorrido. Por otro lado, al ser un plano de gran continuidad, atraviesa toda la sección y corta las discontinuidades de tipo sistemático (diaclasas) generando cuñas e inestabilidades de gran tamaño, caída de bloques y hasta colapsos. Su resistencia, es muy inferior al resto del macizo rocoso y puede estar sometida a presiones intersticiales constituyendo planos principales de rotura, siendo el propio relleno quien constituye los mismos.

Por todo lo recientemente expuesto, este nivel de arcillas será considerado a lo largo del presente estudio, como un plano de debilidad que controla tanto la morfología como la estabilidad de las cavernas.



**Figura 4. A la izquierda: Afloramiento del nivel arcilloso en superficie; expuesta por la antigua actividad minera. A la derecha: Intersección del sector M de la caverna Arenal con el nivel arcilloso (plano inclinado de coloración grisácea con tintes rojizos, anaranjados y amarillos). Se observan espeleotemas de tipo coladas, de coloración amarillo. La brecha rojiza (banco 6) se observa encima con tonalidades rojizas, amarillas y naranjas.**

El estudio de discontinuidades singulares como la reacción descripta, es uno de los aspectos geológicos más importantes para conocer la estabilidad de infraestructuras subterráneas. Por lo tanto, se dará mayor detalle respecto a las características de expansividad de la misma en un apartado.

### Expansividad de las arcillas

Es de alto interés conocer el potencial de expansividad de las arcillas presentes ya que el proceso de expansión/contracción durante las variaciones de humedad podría ser un factor desencadenante de procesos gravitacionales, desestabilizando bloques del techo y/o paredes del sistema cavernario.

A efectos prácticos, dado que la expansividad se relaciona con el contenido arcilloso, es habitual emplear parámetros de caracterización de arcillas para evaluar y graduar su posible expansividad. Generalmente se consideran cuatro grados de expansividad y existen tres metodologías principales para clasificarlas:

1) Por identificación mineralógica, es muy útil para determinar el material y sus propiedades básicas, pero no son prácticas ni económicas para consideraciones geotécnicas. La composición mineralógica de los suelos expansivos tiene una influencia importante en la expansión potencial. Por lo tanto, el potencial de hinchamiento de cualquier arcilla se puede evaluar mediante la identificación del mineral constituyente. Las cinco técnicas que se pueden utilizar son las siguientes: Difracción de Rayos X; Análisis Térmico Diferencial; Adsorción de tintes; Análisis químicos; Microscopio electrónico de barrido;

2) Por métodos indirectos a partir de propiedades básicas de la arcilla: Límites de Atterberg; Límites de contracción; Ensayo de expansión libre; Contenido de coloides; y

3) Por métodos directos, mediante el uso del consolidómetro. Ofrecen información muy útil para cálculos ingenieriles.

Para el presente estudio se optó por evaluar la expansividad de las arcillas mediante métodos indirectos: 1) relacionando los límites de Atterberg; y 2) por medio de ensayos de expansión libre (FST por sus siglas en inglés).

Holtz y Gibbs (1956) demostraron que el índice de plasticidad y el límite líquido son índices útiles para determinar las características de hinchamiento de la mayoría de las arcillas. A su vez, Seed et al., (1962) han demostrado que el

**Tabla 2. Clasificación de expansión del suelo basado en el Índice de Plasticidad (IP).**

GRADO DE EXPANSIÓN	IP (%)		
	Holtz y Gibbs (1956)	Chen (1975)	IS 1498 (1970)
BAJO	< 20	< 15	< 12
MEDIO	12 - 34	10 - 35	12 - 23
ALTO	23 - 45	20 - 55	23 - 32
MUY ALTO	> 32	> 35	> 32

índice de plasticidad por sí solo puede usarse como una indicación preliminar de las características de hinchamiento de la mayoría de las arcillas y esta postulación fue seguida de numerosos trabajos propuestos por distintos autores, entre los que podemos destacar los trabajos de Chen (1975) e IS 1498 (1970) entre otros (Tabla 2).

Se tomaron cuatro muestras del nivel arcilloso, dos de ellas de la caverna Arenal. Las mismas fueron ensayadas bajo norma ASTM D 4318 para determinar los límites de Atterberg y clasificarlas en función del IP según diferentes autores (Tabla 3 y Tabla 4).

Por otro lado, el Ensayo de Expansión Libre (FST por sus siglas en inglés: Free Swell Test) es un procedimiento sencillo que registra el aumento del volumen expresado en porcentaje. Fue propuesto por Holtz y Gibbs (1956), pero no recomendaron ningún valor de referencia para su clasificación, por lo tanto, el criterio aplicado en este estudio para clasificar al suelo en función del resultado alcanzado es según IS 1498 (1970) y cuyos resultados se puede observar en la Tabla 5.

En función de las observaciones del nivel arcilloso (coloración, textura y contenido de minerales de carbonato de calcio) y de las clasificaciones de las mismas por límites de Atterberg, se puede caracterizar al nivel de arcillas como margas de grado bajo a medio de expansividad.

## CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MACIZO ROCOSO

Habiendo descripto las características de las discontinuidades sistemáticas, de la discontinuidad singular y propiedades de expansividad de las arcillas, se avanzó con la

**Tabla 3. Descripción macroscópica y parámetros índices de las muestras analizadas.**

Muestra	CAVERNA	SECTOR	FST	Límites Atterberg				DESCRIPCIÓN
				LL	LP	IP	Clasif. SUCS	
C002	Arenal	AM	47%	52	25	26	CH	Arcilla de coloración gris. Resistencia estimada en 0,05 a 0,1 Mpa (ISRM, 1981). Contiene Slickensides y otros minerales blancos. Reacciona al HCl.
C003	Arenal	AM	29%	37	23	14	CL	Brecha matriz sostén, de coloración rojiza. Sus clastos subangulosos de variados tamaños son monomicticos (caliza) y la matriz arcillosa de coloración rojiza. Resistencia estimada en 5 a 25 Mpa (ISRM 1981). Reacciona al HCl.

**Tabla 4. Clasificación de las muestras analizadas en función del grado de expansividad basado en el Índice de Plasticidad propuesto por diferentes autores.**

Muestra	IP (%)	Holtz y Gibbs (1956)	Chen (1975)	IS 1498 (1970)
C002	26	Medio-Alto	Medio-Alto	Alto
C003	14	Bajo-Medio	Bajo-Medio	Medio

**Tabla 5. Clasificación de suelos en función del porcentaje de expansividad del FST (IS 1498 (1970)) y los resultados obtenidos.**

IS 1498 (1970)		CLASIFICACIÓN MUESTRAS ANPCC		
GRADO DE EXPANSIÓN	(%)	MUESTRAS	FST	CLASIFICACIÓN IS 1498 (1970)
BAJO	< 50	C002	47%	BAJO
MEDIO	50 - 100	C003	29%	BAJO

sectorización interna de la caverna Arenal, tomando observaciones y datos específicos, para clasificar en función del RMR e Índice Q cada uno de los distintos sectores predeterminados.

La puntuación RMR básica es corregida restando 12 puntos debido a la orientación desfavorable de las cavernas respecto al rumbo paralelo de la estratificación, que como se expresó en el capítulo precedente, controla la estabilidad de las cavernas a partir del plano de debilidad singular con arcillas.

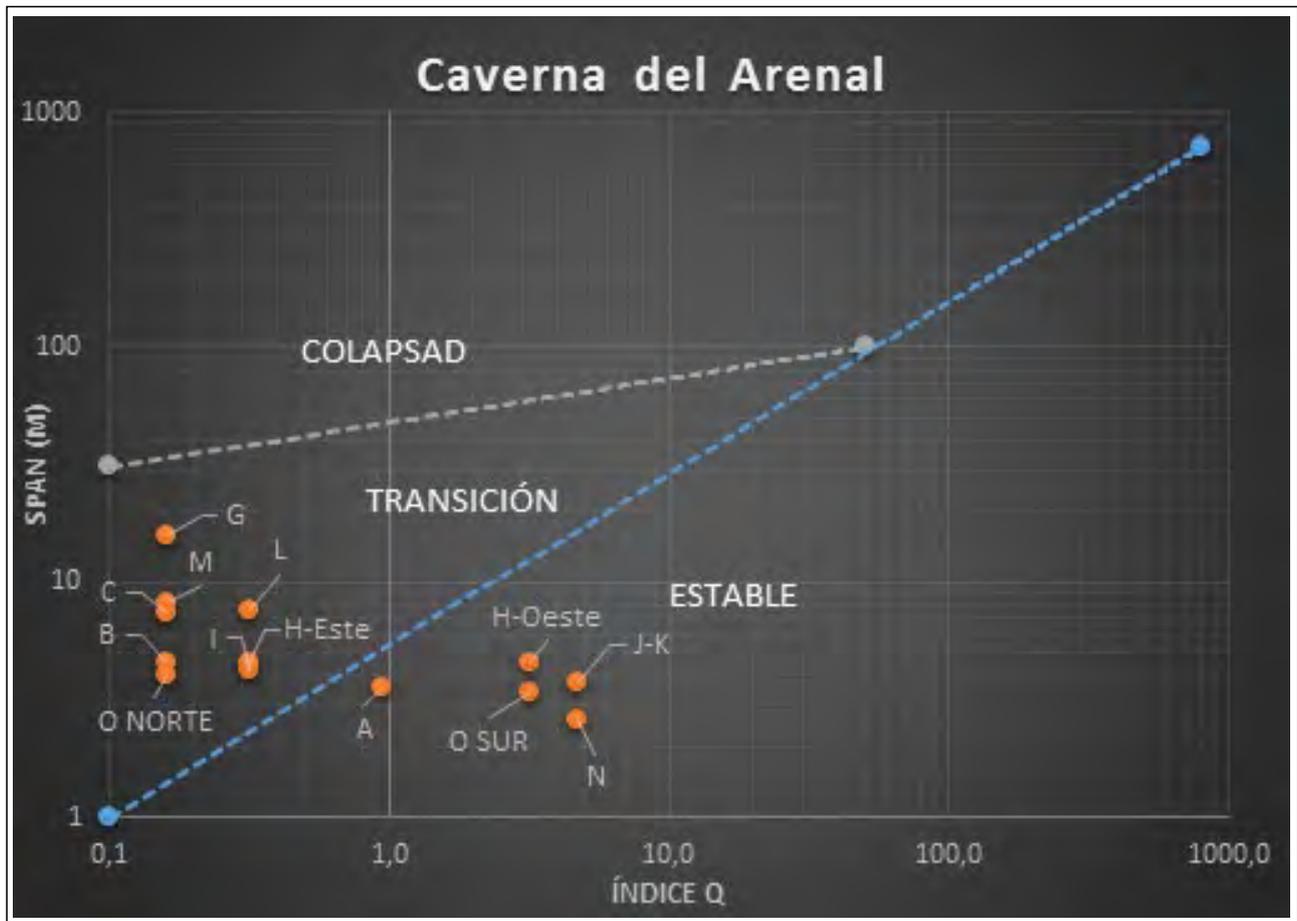
A partir de las clasificaciones RMR y Q la forma del techo, el espesor por encima del mismo, el radio hidráulico y las dimensiones (ancho), se procedió a ponderar cada variable para cada sector de la caverna, aplicando las clasificaciones IGC (Tabla 6) y la adaptación del Índice Q de *Jordá-Bordehore (2017)* (Tabla 7 y Figura 5), alcanzando los mapas de clasificación sectorizada (Figura 6).

**Tabla 6. Información de base y ponderación para clasificación IGC (Brandi et al., 2020) para la caverna Arenal del Sistema Cavernario Cuchillo Curá.**

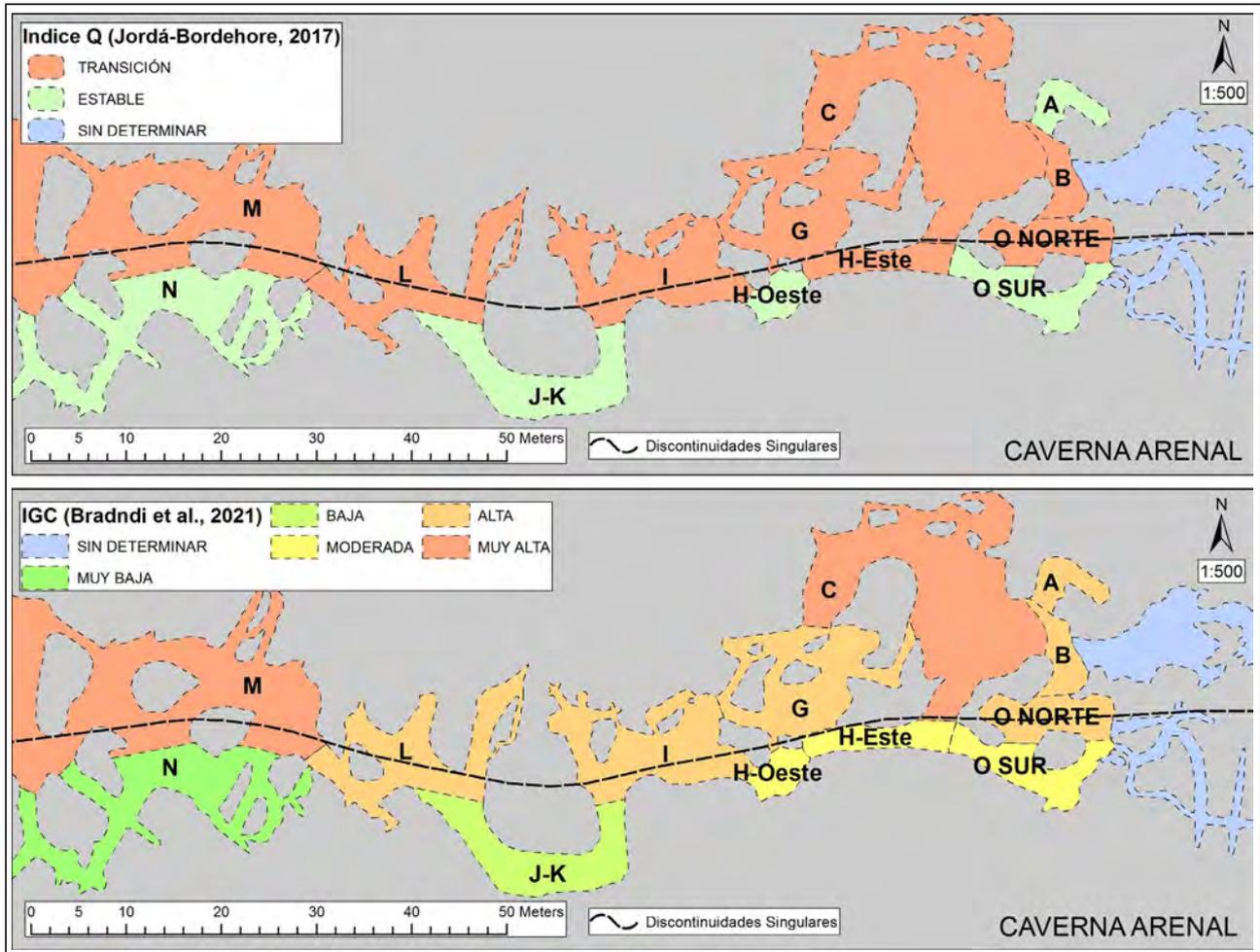
CAVERNA	SECTOR	ÁREA (m <sup>2</sup> )	DESCRIPCIÓN					PUNTUACIÓN					SUSCEPTIBILIDAD A LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL	
			PERÍM. (m)	RH	RMR	CS	CT	RH	RMR	CS	CT	IGC		
ARENAL	A	25,6	26,4	0,97	37	Mala	A Inv.	Small	15	15	0	0	30	Alta
ARENAL	B	29,1	30,9	0,94	37	Mala	A Inv.	Regular	15	15	0	2	32	Alta
ARENAL	C	289,3	139,1	2,08	37	Mala	A Inv.	Regular	0	15	0	2	17	Muy Alta
ARENAL	G	131,5	116,5	1,13	32	Mala	A Inv.	Large	15	15	0	5	35	Alta
ARENAL	H-Este	41,3	37,9	1,09	57	Media	Arco	Large	15	30	10	5	60	Moderada
ARENAL	H-Oeste	23,4	20,6	1,14	57	Media	Arco	Large	15	30	10	5	60	Moderada
ARENAL	I	136,8	102,4	1,34	37	Mala	A Inv.	Regular	15	15	0	2	32	Alta
ARENAL	J-K	103,8	68,0	1,53	72	Buena	Planar	Large	15	45	4	5	69	Baja
ARENAL	L	129,7	124,2	1,04	34	Mala	A Inv.	Regular	15	15	0	2	32	Alta
ARENAL	M	454,4	235,8	1,93	29	Mala	A Inv.	Regular	0	15	0	2	17	Muy Alta
ARENAL	N	214,0	238,6	0,90	64	Buena	Arco	Large	25	45	10	5	85	Muy Baja
ARENAL	O NORTE	56,4	38,7	1,46	37	Mala	A Inv.	Large	15	15	0	5	35	Alta
ARENAL	O SUR	58,4	51,3	1,14	57	Media	Arco	Large	15	30	10	5	60	Moderada

**Tabla 7. Descripción y ponderación de los parámetros requeridos para caracterización por Índice Q.**

CAVERNA	SECTOR	DESCRIPCIÓN	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Índice Q
ARENAL	A	Sector de portal, con RQD de 99,16%, cuatro familias de discontinuidades y algunas ocasionales, con juntas rugosas a irregular planares, ligeramente alteradas. Seco a ligeramente húmeda. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	30	1,5	2	1	2,5	0,95
ARENAL	B, C, G, M y O-NORTE	Sectores con RQD que supera el 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas, con un nivel continuo que contiene minerales arcillosos de espesor considerable para impedir el contacto entre las caras; expansividad de arcillas media a baja; goteo de agua.	95	12	1	10	1	5	0,16
ARENAL	H-ESTE	RQD superior a 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas. Toma influencia, aunque sin intersectar con la cavidad, un nivel continuo que contiene minerales arcillosos de espesor considerable para impedir el contacto entre las caras; expansividad de arcillas media a baja; goteo de agua.	95	12	1	10	1	2,5	0,32
ARENAL	H-OESTE y O-SUR	RQD superior a 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas. Juntas suaves a onduladas con caras ligeramente alteradas y algunos minerales no reblandecibles, libre de arcillas. Seco. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	12	2	2	1	2,5	3,17
ARENAL	I y L	Sectores con RQD que supera el 99%. Se describieron dos familias y algunas juntas, con un nivel continuo que contiene minerales arcillosos de espesor considerable para impedir el contacto entre las caras; expansividad de arcillas media a baja; goteo de agua.	95	6	1	10	1	5	0,32
ARENAL	J-K	Sector con RQD superior a 99%. Se describieron dos familias y algunas juntas, con superficies rugosas a irregular planares, ligeramente alteradas. Seco a ligeramente húmedo. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	6	1,5	2	1	2,5	4,75
ARENAL	N	RQD mayor a 99%. Se describieron tres familias y algunas juntas, rugosa a irregular ondulada. Ligeramente alteradas. Seco a ligeramente húmedo. Roca competente, esfuerzos bajos cercanos a superficie ( $ECS/\sigma_1 > 200$ ).	95	12	3	2	1	2,5	4,75



**Figura 5. Dispersión de puntos (sectores de las cavernas) sobre la gráfica propuesta por Jordá-Bordehore (2017) en función del Índice Q y el span (ancho de cavidad), para determinar el estado de estabilidad de cada sector.**



**Figura 6.** Zonificación de la caverna Arenal en función de la susceptibilidad a la inestabilidad estructural de las clasificaciones de Jordá-Bordehore (2017) y Brandt et al., (2021). Puede observarse como la intersección entre el plano de debilidad arcilloso con la cavidad controla la estabilidad de la caverna. Desde la intersección, hacia el norte el comportamiento es de alta a muy alta susceptibilidad a ser inestable según el IGC o de transición según el Índice Q de Jorda-Bordehore (2017).

En los mapas desarrollados, se puede apreciar el fuerte control que ejerce el plano de debilidad arcilloso. Hacia el norte de la intersección entre esta discontinuidad con la caverna, y en las zonas donde esta tiene influencia, el sistema se presenta con inestabilidad activa según los resultados de las clasificaciones empleadas y por observación directa de bloques caídos, cicatrices de rotura o desprendimiento relativamente frescos en el techo de algunos sectores, y por diferencias entre algunas secciones topográficas relevadas durante las campañas de campo.

## DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

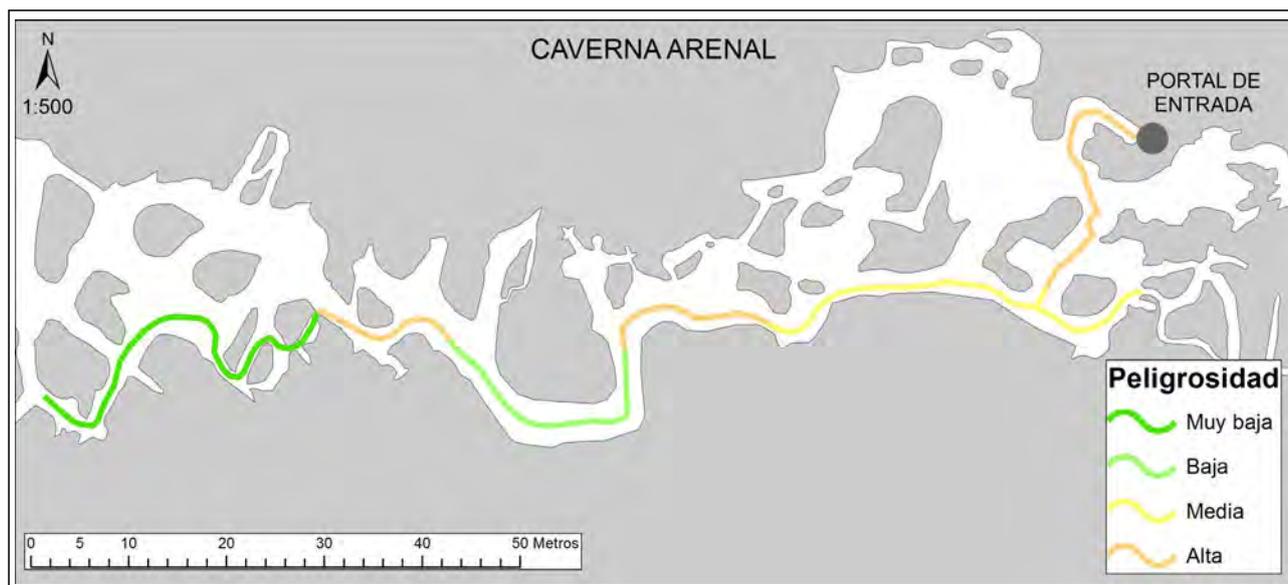
El sendero de menor riesgo se propone en función de la estabilidad estructural determinada mediante las clasificaciones IGC de Brandt et al. (2020) y el Índice Q con la adaptación de Jorda-Bordehore (2017) (Figura 7). Sin embargo, para alcanzar los sectores de menor peligrosidad, se debe atravesar áreas con muy alta susceptibilidad a caída de bloques, desprendimientos, colapsos, etc. Por lo tanto, se propone re-

ducir la exposición para disminuir el riesgo, es decir, reducir el tiempo de tránsito por las zonas inestables.

### Indicadores cinemáticos de falla

En este trabajo se destaca la presencia de slickensides (Figura 8) desarrolladas sobre las arcillas y la presencia de planos con marcas de arrastre tectónico (Figura 9) impresas sobre planos de bloques de calizas oolíticas (banco 5), subyacentes al nivel arcilloso.

Las marcas de arrastre tectónico asociadas al contacto entre los bancos 5 y 6 de Elzeard (1987) y las slickensides en arcillas podrían sugerir una estructura de fallamiento, del tipo de falla de estratificación; el plano basal de un pliegue por flexión de falla; o un flexodeslizamiento, donde los planos de estratificación son superficies activas que facilitan el deslizamiento entre los mismos. De ser así, se podría considerar al nivel arcilloso como harina de falla y a la brecha rojiza (banco 6) en el hanginwall como brecha de falla rojiza, con clastos de tamaños variados, angulosos y monomicticos. La posterior circulación de fluidos por esta estructura y la



**Figura 7. Sendero de transitabilidad evaluado. Modifica levemente al propuesto por Elzeard et al., (2003a) y agrega el grado de peligrosidad en cada tramo en función de la clasificación IGC y observaciones de campo.**

brecha, habrían alterado la roca a arcillas rojas (arcillas con óxidos de hierro), debilitando considerablemente al macizo rocoso donde dicha estructura lo cruza.

#### Expansividad de las arcillas

Como bien se mencionó precedentemente, a juzgar por la presencia de minerales del grupo de los carbonatos (reacción al ácido clorhídrico), por su textura suave y plástica típica del material fino (arcillas) y por la clasificación resultante (CH, CL y ML), se sugiere que el material analizado está compuesto por arcillas y carbonatos en proporciones adecuadas para ser calificadas como margas. Su coloración rojiza a anaranjada podría estar relacionada a la oxidación de minerales de hierro. En función de los resultados de laboratorio del ensayo de FST se observa que existe expansividad del material en un grado bajo. Por otro lado, en función del índice de plasticidad se puede estimar el grado de expansividad entre bajo a alto según la clasificación de referencia (Holtz y Gibbs (1956), Chen (1975) o IS 1498 (1970)).

Se sugiere continuar con más estudios para obtener mayor detalle y precisión de las características del material arcilloso: determinación mineralógica, ensayos directos de expansión, muestreo sistemático, entre otros.

#### Consideraciones geotécnicas y auscultación

El control geológico-geotécnico puede realizarse por diferentes motivos, siendo el principal objetivo mantener la seguridad, detectando a tiempo los fallos potenciales del terreno. La supervisión puede realizarse mediante inspección visual rigurosa y metódica y/o por instrumental.

La observación del terreno requiere el conocimiento, entre otros, de la geología estructural, el estado del techo, de las propiedades de la roca, de las aguas subterráneas y tensiones del subsuelo, así como la interacción de todos estos factores.

La Figura 7 muestra el sendero de menor riesgo que se propone en este trabajo, realizado en función del análisis geotécnico y las clasificaciones geomecánicas empleadas a lo largo del presente estudio. Se puede observar que se atraviesa por sitios de mediana, alta y muy alta susceptibilidad a la inestabilidad estructural (caída de bloques, colapsos, etc.). Por lo tanto, fueron sugeridas tomar medidas de estabilización, saneamiento y prevención en aquellos sectores de mayor peligrosidad para disminuir el riesgo durante el tránsito de personas. Entre estas medidas se sugiere: evaluar la posibilidad de llevar a cabo el saneamiento por palanqueo para retirar o disminuir la energía potencial de bloques y rocas pequeñas que se encuentren en equilibrio sensible, ubicados en altura y en sectores de paso obligado; evaluar la posibilidad de implementar medidas de protección y/o estabilización en sectores inestables de paso obligado (portales de entrada y otros sectores); y, finalmente, mientras no se tomen medidas de estabilidad estructural, la mejor opción para reducir el riesgo, es disminuir la exposición de quienes ingresen. A tal fin, para este caso puntual, se considera que la traza de bajo riesgo propuesta en Elzeard et al., (2003a) debe ser levemente modificada, ajustándose a un recorrido por las zonas estables. Sin embargo, para alcanzar dichos sectores, no es posible hacerlo sin antes atravesar áreas con alta susceptibilidad a caída de bloques, desprendimientos, colapsos, etc. Por lo tanto, se propone reducir la exposición para disminuir el riesgo, es decir, reducir el tiempo de tránsito por las zonas inestables. Por ejemplo, se recomienda transitar sin detenerse, con extrema precaución y de a uno por vez, desde el portal de entrada, a través de la zona "A" hacia la zona "H" u "O Sur".

## CONCLUSIONES

La caverna Arenal presenta factores que condicionan la



**Figura 8.** Detalle del nivel arcilloso con slickensides (flechas blancas). ¿Arcillas expansivas o superficie de falla con estrías? Óxidos de hierro asociados.

estabilidad de las mismas. Si bien, la litología (calizas) y la resistencia de la matriz es en su mayoría favorable, la calidad del macizo rocoso en cuanto a densidad de fracturación (RQD) es muy buena y las condiciones hidrogeológicas son favorables (apenas se observa humedad y goteo ocasional); existe una discontinuidad singular considerada como la principal condicionante de los procesos gravitacionales dada su orientación desfavorable, su amplia extensión, su relleno de arcillas grises a rojizas con grado bajo a medio de expansividad, y por su considerable espesor.

Esta discontinuidad atraviesa toda la sección del sistema cavernario, de este a oeste, y corta las discontinuidades de tipo sistemático (diaclasas) generando cuñas e inestabilidades de gran tamaño, caída de bloques y hasta colapsos. Su resistencia, en conjunto con la brecha rojiza suprayacente, es muy inferior a la del resto del macizo rocoso.

El buzamiento al norte de este plano de debilidad hace que el sector septentrional de las cavernas se presente con mayor susceptibilidad a la inestabilidad estructural. Los mapas resultantes de las clasificaciones IGC (Brandi *et al.*, 2020)



**Figura 9.** Caverna Arenal, Sector I. Fragmento del nivel 5 caído, desprendido del nivel arcilloso. La superficie observada ronda el metro cuadrado. Izquierda: Fotografía sin modificaciones. Derecha: Se señalan algunas de las marcas de arrastre más notorias ocasionadas, hipotéticamente, por movimiento tectónico.

e Índice Q, adaptado por *Jordá-Bordehore (2017)*, reflejan dicha condición y avalan la recomendación de *Elzeard et al. (2003a y 2003b)* respecto a transitar por la margen sur. En caso de adentrarse a la misma, se recomienda transitar por el camino de menor riesgo propuesto, y en los sectores de mayor peligrosidad, transitar sin detenerse, con extrema precaución y de a uno por vez para disminuir la exposición y el riesgo.

A fines prácticos, si bien los resultados de los estudios de expansividad presentan baja precisión, nos están indicando que existe expansividad del material contenido en la discontinuidad singular, condición que fue considerada en los cálculos geotécnicos de este informe. Además, la existencia de material con potencial de expansión, nos indica un nuevo factor desencadenante entre los ya mencionados: las precipitaciones puede llevar a la infiltración de agua a través de la porosidad secundaria hasta alcanzar el techo del sistema cavernario y puede aumentar la carga estática y la presión de poros, disminuir las fuerzas friccionales, modificar las fuerzas cohesivas y puede humectar y expandir las arcillas de manera que aquellos sectores en equilibrio sensible o bloques potencialmente inestables puedan ceder ante los efectos gravitacionales. Por lo tanto, se sugiere monitorear los cambios de humedad y entrada de agua en el sistema cavernario.

Finalmente, las clasificaciones IGC e Índice Q, han arrojado similares resultados para cada sector analizado. Ambas son factibles de uso para continuar con la caracterización del Sistema Cavernario Cuchillo Curá. Sin embargo, a pesar de que la IGC arroja mayor detalle, con una escala de cinco posibles grados de susceptibilidad a la inestabilidad estruc-

tural, para agilizar el relevamiento del resto de las cavernas podemos concluir que sería suficiente y satisfactorio el uso del Índice Q, adaptado por *Jordá-Bordehore (2017)*, ya que es más expeditivo a la hora del relevamiento en campo y no depende del relevamiento topográfico preexistente ni de apreciaciones subjetivos como la forma del techo.

## AGRADECIMIENTOS/FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto "Estudios Espeleológicos de Base en el Sistema Cavernario Cuchillo Curá" a pedido del Ministerio de las Culturas de la Provincia del Neuquén, bajo el contrato CFI-FUNYDER, (EX-2021-00050201-CFI-GES#DCS) y el financiamiento del Consejo Federal de Inversiones.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

"Conceptualización, metodología, análisis de datos, redacción, preparación del borrador original: Juan M. Catinari; Revisión y edición: Todos los autores contribuyeron. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final."

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

"Todos los autores declaran que no existe conflicto de interés alguno".

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anghilante, C., Balbi, A., Bluvstein, D., Calzato, W., Y Carabelli, L. (1990). Evaluación de Impacto Ambiental Sistema de Cuchillo Cura. *Salamanca*, 6(6), 7-52.
- Barton, N., Lien, R. Y Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics* (6), 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1978). Determining rock mass deformability: experience from case histories. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 15(5), 237-247.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Brandi, I., Barbosa, M., Barata, A., De Paula, R., Correa, T., Lima, H., Y Osborne, R. (2020). Cave Geomechanical Index (CGI). Classification and Contribution to the Conservation of Natural Caves in the Iron Mines. *Geoconservation Research*, 3(2), 134-161.
- Brown, E. T. (1981). *Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*. ISRM Suggested methods. Pergamon Press.
- Catinari, J.M., Gatica, J., Gurlekián Borrás, H., Luri, H., Maurino, E., Pappas, M., Redonte, G., Santana, N., Sicilia, S., Tedesco, E. Y Zungri, L. (2022). *Estudios Espeleológicos de Base en el Sistema Cavernario Cuchillo Curá*. Informe Final, CFI.
- Chen, F.H. (1975). *Foundation on Expansive Soils*. Elsevier.
- Deere, D. U. (1964). Technical description of rock cores. *Rock Mechanics Engineering Geology*, (1), 16-22.

- Elzeard, L. (1987). Geología del sistema de cavernas del cordón Cuchillo – Curá. *Salamanca*. 3(3), 3-11.
- Elzeard, L., Bolinaga, R., Carubelli, O. H., Gonzalez, O. Y Silvestri, M. (2003a). *Estudio de riesgo de inestabilidad de macizo en caverna del Arenal, Neuquén*. Informe Técnico. GeoComahue.
- Elzeard, L., Bolinaga, R., Carubelli, O. H., Gonzalez, O. Y Silvestri, M. (2003b). *Estudio de riesgo de inestabilidad de macizo en caverna del Gendarme, Neuquén*. Informe Técnico. GeoComahue.
- González De Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Holtz, W. G., Y Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 121(1), 641-663.
- IS: 1498. (1970). *Indian standard classification and identification of soils for general engineering purposes*. BIS, New Delhi
- Jordá-Bordehore, L. (2017). Stability assessment of natural caves using empirical approaches and rock mass classifications. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(8), 2143-2154.
- Lambert, L. R. (1956). *Descripción Geológica de la Hoja 35b, Zapala*. Dirección Nacional de Minería.
- Priest, S. D., Y Hudson, J. A. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 13(5), 135-148).
- Redonte, G., Maurino, E., Martínez, O., Costa, H., Tedesco, E., Lentijo, E. Y Zungri, L. (2018). *Levantamiento topográfico, Q4 Hoja GEA 286, Caverna del Arenal – Sistema Cuchillo Curá*. Grupo Espeleológico Argentino.
- Seed, H. B., Woodward Jr, R. J., & Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 88(3), 53-87.

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagaj.org.ar/>  
Viglianchino, L.E., Grondona, S.I., Bedmar, F., Angelini, H.P. y Massone, H.E.

El mapa de vulnerabilidad del acuífero como instrumento de prevención de la contaminación del agua en áreas agrícolas. La cuenca del Arroyo de los Padres (Partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires, Argentina)  
e011, <https://doi.org/10.59069/24225703e011>

# El mapa de vulnerabilidad del acuífero como instrumento de prevención de la contaminación del agua en áreas agrícolas. La cuenca del Arroyo de los Padres (Partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires, Argentina)

## The aquifer vulnerability map as a tool for preventing water contamination in agricultural areas. The case of Los Padres stream basin (General Pueyrredón district, Buenos Aires province, Argentina)

 Liliana Ester Viglianchino<sup>1\*</sup>   Sebastián Iván Grondona<sup>2,3\*</sup>   Francisco Bedmar<sup>4\*</sup>   
 Hernán Pablo Angelini<sup>1</sup>   Héctor Enrique Massone<sup>2</sup> 

\* Contacto

Recibido: 02 de junio de 2023 • Aceptado: 12 de octubre de 2023 • Publicado: xxxxxx de 2023

### Resumen

El objetivo de este trabajo es comparar y evaluar los resultados que brindan cinco metodologías de evaluación de vulnerabilidad del acuífero en un área de actividad agrícola intensiva en el SE bonaerense, cuatro de ellas evalúan vulnerabilidad intrínseca y una específica. El área de estudio es la Cuenca del Arroyo de Los Padres, donde el acuífero Pampeano es la única fuente de agua. Las metodologías utilizadas son Ekv, GOD/GOD-S y DRASTIC/DRASTIC-P. La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero se realizó en entorno ArcGis 10.1. En general, se observó que las zonas más vulnerables coinciden con las zonas bajas de la cuenca, mientras que las zonas menos vulnerables se encuentran en las zonas altas. El método Ekv identifica más del 75% del área de estudio como de "vulnerabilidad moderada", siendo el menos restrictivo y adecuado para una primera aproximación. Las metodologías GOD y GODS muestran un área extensa de "baja vulnerabilidad", destacándose que GODS muestra una vulnerabilidad baja en el 96% del territorio. DRASTIC y DRASTIC-P muestran mayores áreas de "alta vulnerabilidad", siendo estas metodologías las que utilizan más variables y proporcionan resultados más confiables y cercanos a la realidad. En resumen, los métodos DRASTIC y DRASTIC-P son más útiles para la toma de decisiones y la protección del acuífero, ya que consideran variables importantes relacionados con su vulnerabilidad. Estos métodos proporcionan un mejor equilibrio entre incertidumbre y utilidad en la toma de decisiones en la inestabilidad de la misma.

Palabras clave: agua subterránea, lixiviación, calidad.

1 Instituto de Innovación para la Producción Agropecuaria y el Desarrollo Sostenible. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

2 Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario. Universidad Nacional de Mar del Plata. Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires.

3 Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Universidad Nacional de Mar del Plata. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

4 Departamento de Producción Vegetal, Suelos e Ingeniería Rural. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata.

## Abstract

The objective of this study is to compare and evaluate the results provided by five methodologies for assessing aquifer vulnerability in an area of intensive agricultural activity in southeastern Buenos Aires, four of them assess intrinsic vulnerability and one specific. The study area is the Arroyo de Los Padres Basin, where the Pampeano aquifer is the sole source of water. The methodologies used include Ekv, GOD/GOD-S, and DRASTIC/DRASTIC-P. The aquifer vulnerability assessment was conducted using ArcGIS 10.1 software. In general, it was observed that the most vulnerable zones coincide with the low-lying areas of the basin, while the less vulnerable zones are found in the higher areas. The Ekv method identifies over 75% of the study area as having moderate vulnerability, making it the least restrictive and suitable for initial assessments. The GOD and GODS methodologies show a large area classified as "low vulnerability," with GODS indicating low vulnerability in 96% of the territory. DRASTIC and DRASTIC-P reveal greater areas of "high vulnerability." These two methodologies utilize more variables and provide more reliable and realistic results. In summary, the DRASTIC and DRASTIC-P methods are more useful for decision-making and aquifer protection, as they consider important variables related to vulnerability. These methods offer a better balance between uncertainty and utility in decision-making processes.

**Keywords:** groundwater, leaching, quality.

## INTRODUCCIÓN

El agua se utiliza para la producción de alimentos de diversas maneras, entre las que se pueden incluir la agricultura, la ganadería y la acuicultura. El uso del agua en la agricultura va desde esencialmente cultivos de secano, dependiendo de la humedad del suelo de las lluvias, hasta el riego total (UNESCO, 2021) y constituye, al mismo tiempo una fuente y un receptor de los problemas de la calidad del agua. Durante las últimas décadas, se ha intensificado la producción de alimentos en muchas economías desarrolladas y en rápido crecimiento que luchan por la seguridad alimentaria; esta intensificación implicó altos niveles de uso de fitosanitarios y nutrientes para maximizar los rendimientos de los cultivos, así como un aumento significativo en la producción ganadera (Lu y Tian, 2017).

En este contexto, las estrategias de prevención de la contaminación del recurso hídrico son estudiadas y recomendadas desde hace décadas. Por ejemplo, Sagardoy (1993) identifica entre las medidas de acción que deberán adoptarse en la agricultura en lo que respecta a la calidad del agua la "prevención de los efectos negativos de las actividades agrícolas sobre la calidad del agua utilizada en otras actividades sociales y económicas y sobre las tierras húmedas, entre otros medios, mediante el aprovechamiento óptimo de los insumos agrícolas y la reducción, en la medida de lo posible, del uso de insumos externos en actividades agrícolas". En áreas rurales bajo riego, Foster et al. (2002) destacan tres cargas contaminantes con potencial afectación al agua subterránea: nitratos, salinidad y fitosanitarios.

Una herramienta válida para la prevención es la utilización de índices que permitan valorar el riesgo de contaminación que pueden representar diferentes compuestos; entre ellos, Arregui et al., (2013) identifican varios indicadores que se han propuesto en distintos países para estimar el impacto ambiental de fitosanitarios; entre ellos se destacan: GUS (Groundwater Ubiquity Score) (Gustafson, 1989); Niveles de daño ambiental (Higley y Wintersteen, 1992); EIQ (Envi-

ronmental Impact Quotient) (Kovach et al., 1992); SYNOPSIS (Gutsche y Rossberg, 1997), IPEST (Girardin et al., 1999). Rao et al. (1985) desarrollaron un modelo para determinar la contaminación potencial del agua subterránea basado en el riesgo de lixiviación de los plaguicidas a través del perfil del suelo; dicho método establece la determinación de dos índices: factor de atenuación (AF) y factor de retardo (RF). El caso de los fitosanitarios ha sido, tal vez, el más estudiado desde la perspectiva de índices de potencial de lixiviación; estos índices pueden resultar de gran utilidad al comparar los riesgos relativos de diferentes estrategias de manejo en los sistemas productivos con el fin de minimizar el riesgo de contaminación (Bedmar et al., 2015).

Así, evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación proveniente de la superficie independizándose de cuál es el compuesto aplicado y la forma de aplicación, es otra herramienta de prevención y constituye un instrumento de ayuda a la gestión del agua al permitir identificar en un territorio áreas con mayor o menor grado de susceptibilidad del acuífero ante un contaminante que proviene de la superficie. En este sentido, los mapas de vulnerabilidad intrínseca del acuífero son herramientas que contribuyen a enfocar las estrategias de control y así preservar la calidad del agua subterránea. En general, estos mapas definen indirectamente zonas más o menos aptas para la implantación de las diferentes actividades a desarrollarse en función del impacto que estas pueden tener sobre los recursos hídricos subterráneos del área, y zonas en las que no debería implementarse ningún tipo de actividad o en las que deberían llevarse a cabo modificaciones físicas que impidan la llegada de contaminantes (Foster et al., 2002, 2013).

El concepto de vulnerabilidad de acuíferos fue introducido en la década de 1960 (Margat, 1968) basándose en el hecho de que la zona no saturada, ubicada por encima del nivel freático, proporciona normalmente un cierto grado de protección a las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen tanto natural como antrópico. En este sentido, exis-

ten dos grandes corrientes relacionadas a su abordaje: vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica. La primera es aquella que deriva exclusivamente de las propiedades y comportamiento del acuífero y de su entorno (profundidad del agua, permeabilidad de la zona no saturada, cobertura de suelo, recarga neta, etc.); y la segunda, es la que considera, además del comportamiento del medio, el tipo y carga de un determinado contaminante o familia de contaminantes (Vrba y Zaporozec, 1994). Ambas aproximaciones tienen sus ventajas y desventajas, y han sido bien descritas por Foster et al. (2002) y Auge (2004).

Desde mediados de la década de 1980, el marco teórico de este concepto se ha fortalecido de manera constante, mientras que desde lo instrumental la mayoría de los métodos de evaluación de vulnerabilidad intrínseca del acuífero utilizan variables como profundidad del nivel freático, litología de la zona no saturada, pendiente y textura del suelo, dando como resultado una representación del territorio en la que se pueden identificar zonas con distinta susceptibilidad del acuífero ante la llegada de un contaminante desde la superficie. La premisa básica del concepto de vulnerabilidad es, según Foster et al. (2002), que los mecanismos de recarga del agua subterránea y la capacidad de atenuación natural del perfil de suelo a los contaminantes varían ampliamente con las condiciones geológicas cercanas a la superficie del terreno. Así, en lugar de aplicar controles universales sobre los usos del territorio potencialmente contaminantes, es más efectivo y menos perjudicial para el desarrollo econó-

mico, modificar el tipo y nivel de control de acuerdo a cuán susceptible resulta el acuífero en el área de interés, lo que conduce a la necesidad de contar con información cartográfica que logre discriminar, en dicha área, zonas con diferentes categorías de vulnerabilidad (Massone et al., 2008, Masone y Barilari, 2020).

La pregunta que guía la presente investigación es: ¿Cuáles son las potencialidades y restricciones que ofrecen los principales métodos de la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos para las condiciones hidrogeológicas del SE bonaerense?. El objetivo de este trabajo es comparar y evaluar los resultados que brindan cinco metodologías de evaluación de vulnerabilidad (intrínseca y específica) del acuífero en un área de actividad agrícola intensiva en el SE bonaerense.

## ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Arroyo de Los Padres (Figura 1) se ubica en el partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires en la República Argentina. Ocupa 103 Km<sup>2</sup> y el Arroyo de los Padres se extiende a lo largo de unos 18 km, desde las sierras hasta desembocar en la Laguna de Los Padres la cual presenta una longitud máxima de 2,065 km, un área de 2 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 2,40 m (Romanelli, 2012). La cuenca es parte de la llanura pampeana argentina, caracterizada por el clima húmedo (unos 979 mm/año de precipitación promedio anual y 732 mm/año de evapotranspiración

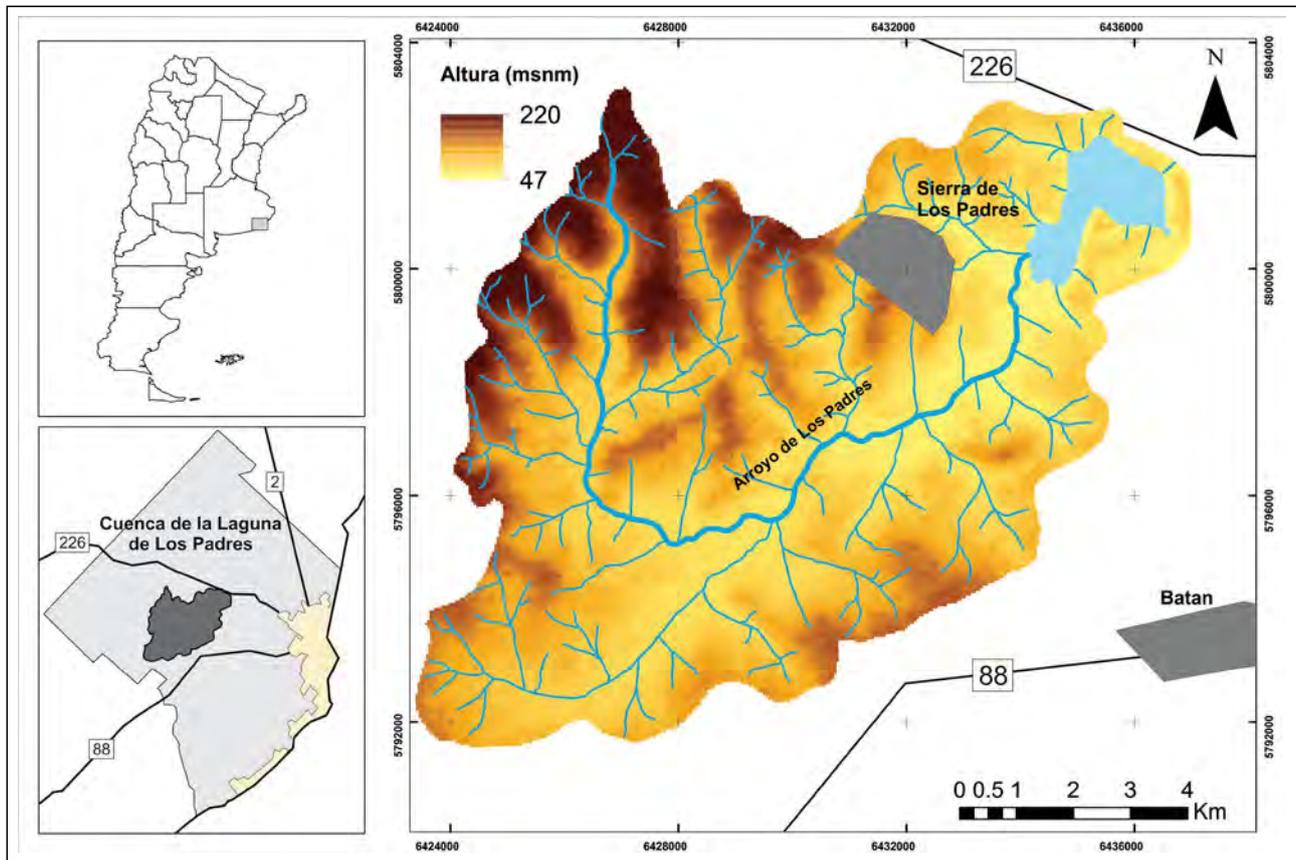


Figura 1. Ubicación del área de estudio

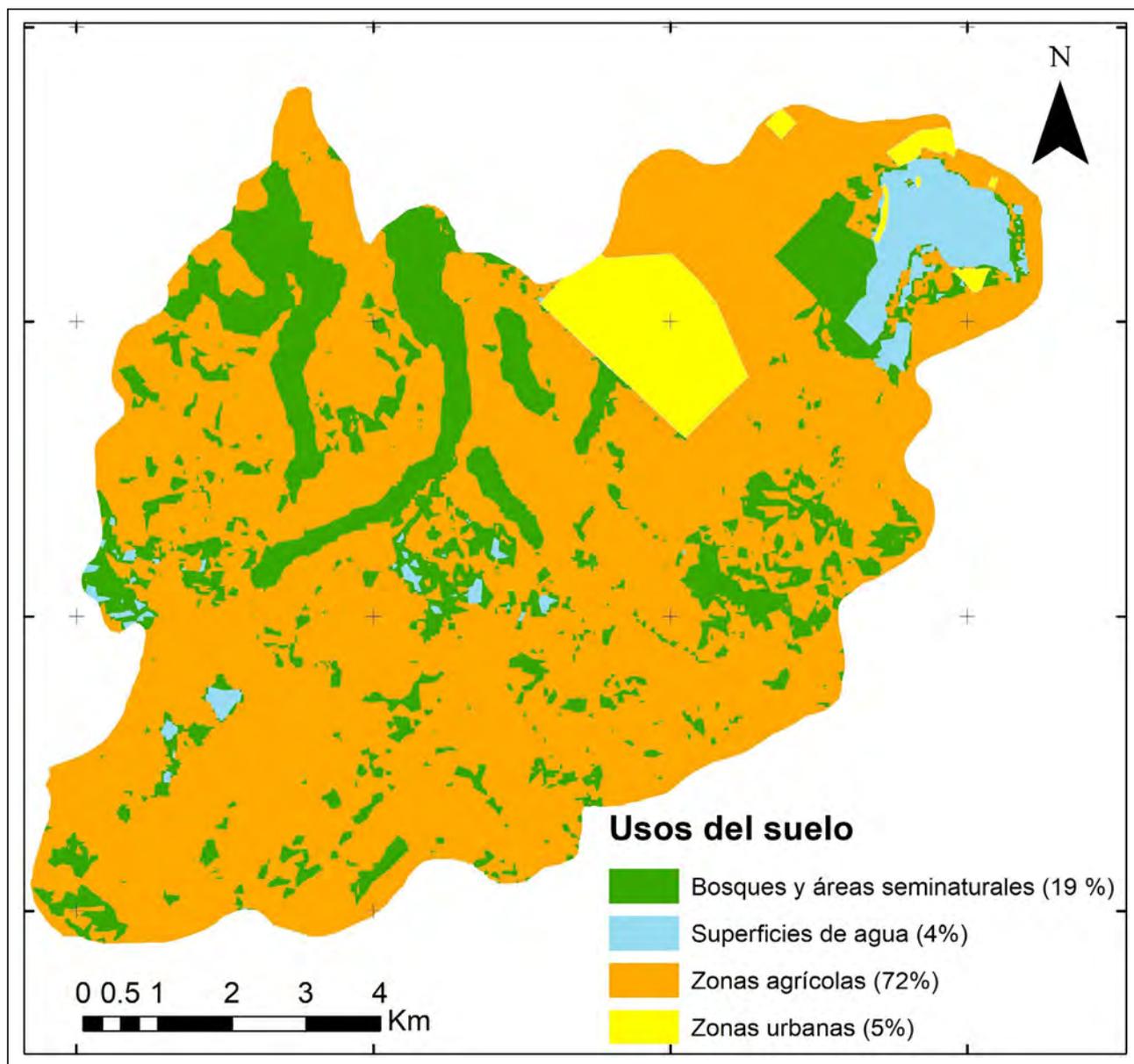


Figura 2. Usos del suelo en la cuenca de la Laguna de Los Padres.

potencial y suelos en su mayoría argiudoles típicos de alta productividad agrícola. Hacia el noroeste y sur de la cuenca aparecen bloques serranos pertenecientes al Sistema de Tandilia, constituidos por estratos de rocas ortocuarcíticas.

Como sucede en gran parte de la región, la única fuente de aprovisionamiento de agua la constituye el acuífero denominado “Pampeano”, de tipo libre o freático y que está constituido esencialmente por intercalaciones de limos y arenas finas de origen eólico y fluvial. Esta unidad se apoya directamente sobre el basamento hidrogeológico conformado por rocas de tipo ortocuarcítico (Auge, 2004). La profundidad oscila entre los 35 (zona serrana) y 2 m (hacia laguna de los Padres) y la dirección general del flujo subterráneo es SW-NE (Romanelli, 2012). Este acuífero tiene una transmisividad media del orden de 700 m<sup>2</sup>/día y una permeabilidad media de 10 a 15 m/día (Bocanegra et al., 1993).

La cuenca forma parte del denominado “Cinturón Hortícola de Mar del Plata” que es uno de los principales centros productivos de hortalizas de hoja y fruto del país, con aproximadamente 1000 productores con diferentes características socio-productivas y tecnológicas (Viglianichino et al., 2021a). Más del 70% de la superficie de la misma se destina a esta producción (Figura 2), y cuenta con 9.500 hectáreas a campo y 650 hectáreas bajo cubierta, totalizando una producción de 220.000 y 98.000 toneladas respectivamente, para el ciclo 2016/2017 (Atucha et al., 2018). Los principales cultivos realizados a campo son maíz dulce, lechuga y zanahoria; en tanto que bajo cubierta se producen tomate, pimiento, lechuga y espinaca. Si bien no existen datos precisos con respecto a la utilización de agua para riego en la cuenca, el municipio lo estima en 2 hm<sup>3</sup>/año (OSSE, 2010).

En base a encuestas realizadas a los productores, Viglianichino et al. (2021a), registraron 34 productos fitosa-

**Tabla 1. Fuentes de datos de los parámetros que componen las metodologías estudiadas.**

VARIABLE	DENOMINACIÓN DE LA VARIABLE	FUENTE
Espesor de zona no saturada o profundidad del acuífero	E, G, D	En base a mapa de isopiezas de la cuenca Romanelli (2012) (Escala 1:50.000) y Modelo de Elevación Digital 90 metros de resolución (Jarvis et al., 2008).
Permeabilidad vertical de la zona no saturada y conductividad hidráulica	Kv, C	En base a la litología de las zonas no saturada y saturada, a partir de Auge (2004).
Tipo de acuífero	O	Mapa Hidrogeológico de la Provincia González (2005) (Escala 1:5.000.000)
Litología de la zona no saturada	I	A partir de la geomorfología del Pdo de Gral Pueyrredón (Martínez, 1998)
Textura de suelo	S	INTA (2015) (Escala 1:50.000).
Recarga	R	Plan director OSSE (2010).
Litología del acuífero	A	A partir de Bocanegra et al. (1992)
Pendiente del terreno	T	Modelo Digital de Elevación del Pdo. de Gral Pueyrredón (Pullar, 2022)

nitarios utilizados en producciones a campo, donde el 41% corresponden a fungicidas (principalmente cyproconazole, fluopicolide y procimidone) el 38% a insecticidas (principalmente imidacloprid, metoxifenocid y tiametoxam) y el 21% a herbicidas (principalmente Atrazina), destacándose frutilla y lechuga como los cultivos con mayor utilización de estos insumos. Respecto a cultivos bajo cubierta, se reportaron 36 ingredientes activos, (el 50% corresponde a fungicidas, un 47% insecticidas, y un 3 % a herbicidas), utilizados mayormente en tomate. Respecto a la presencia de fitosanitarios en agua subterránea, no se registraron niveles detectables de ninguno de los fitosanitarios analizados (atrazina, clorpirifos, flurocloridona, imidacloprid, metalaxil, metolacloro, metribuzin, pirimicarb, tebuconazole y glifosato). Por el contrario, en agua de arroyo se detectó la presencia de atrazina, glifosato, imidacloprid, metalaxil, metolacloro, metribuzin y tebuconazole (Viglianichino et al., 2021b).

## METODOLOGÍA

En este trabajo se han considerado las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos más utilizadas, que corresponden a tres sistemas (Auge, 2004):

- Sistema de Matriz: método Ekv (vulnerabilidad intrínseca).
- Sistema de valoración: métodos GOD y GOD-S (ambos vulnerabilidad intrínseca).
- Sumas ponderadas o suma de conteos por puntos: métodos DRASTIC (vulnerabilidad intrínseca) y DRASTIC-P (vulnerabilidad específica).

La evaluación de la vulnerabilidad del acuífero se realizó en entorno ArcGis 10.1 (ESRI, 2012) y consistió en tres etapas:

- 1) Construcción de los mapas temáticos de base para cada variable a considerar y su posterior transformación a formato raster (resolución espacial de 90 x 90 metros). Según la capa considerada esta transformación se puede hacer de forma directa o en el caso de curvas de nivel o niveles piezométricos, se realizan interpolaciones previamente.

- 2) Los mapas obtenidos se reclasificaron considerando las distintas variables y se le asignaron los pesos y/o valores a cada capa de información según lo establecido por cada metodología.

- 3) Con las capas reclasificadas según lo establecido por cada método se aplicó álgebra de mapas, realizando una suma ponderada de las variables mediante la herramienta "Raster calculator", obteniendo como resultado el mapa de vulnerabilidad final.

Las fuentes de datos utilizados para aplicar los índices propuestos se resumen en la Tabla 1. Los valores de los índices obtenidos se agruparon para obtener zonas de diferentes grados de vulnerabilidad, considerando que, a mayor valor de índice, mayor vulnerabilidad a la contaminación.

Los valores de vulnerabilidad por celda obtenidos fueron reclasificados siguiendo el criterio de "código semáforo" para obtener un máximo de 3 categorías, representadas por las etiquetas: alta, moderada y baja (Tabla 2).

### Método Ekv

Esta metodología está basada en dos variables: espesor de la zona no saturada (E) y permeabilidad vertical de la zona no saturada (Kv) (Auge, 1995, Tabla 3). La metodología se completa con la construcción de la matriz de interacción entre ambas variables, a partir de la suma de sus valores; así se tiene un resultado por pixel que puede variar entre 2 y 10, reconociendo 3 categorías de vulnerabilidad:

**Tabla 2. Clases de vulnerabilidad utilizadas en las metodologías propuestas (modificado a partir de Foster et al., 2002).**

CLASE	SIGNIFICADO
ALTA	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
MODERADA	Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
BAJA	Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.

1. Para índices de E + Kv entre 2 y 4, la vulnerabilidad es baja.

2. Para índices de E + Kv entre 5 y 7, la vulnerabilidad es moderada.

3. Para índices de E+ Kv entre de 8 a 10, la vulnerabilidad es alta.

**Método GOD**

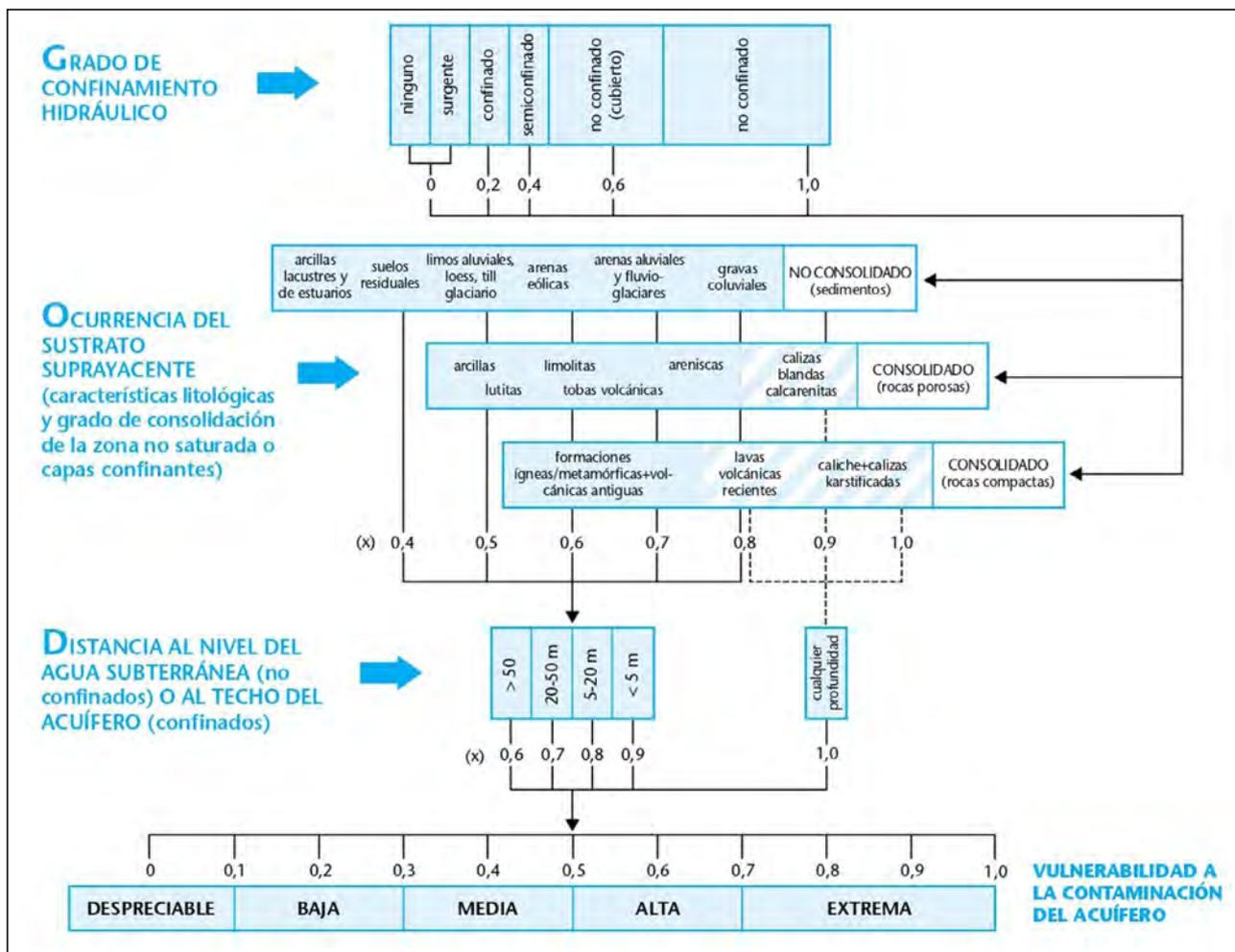
El índice GOD fue desarrollado por Foster e Hirata (1988) para estudiar la vulnerabilidad de un acuífero frente a

**Tabla 3. Variables, valores y ratings de la metodología Ekv (Auge, 1995).**

VARIABLE	VALOR	VALORACIÓN
E: espesor de la zona no saturada (m)	>30	1
	10-30	2
	5-10	3
	2-5	4
	< 2	5
Kv: permeabilidad vertical de la zona no saturada o subsaturada (m/día)	<1x10 <sup>-3</sup>	1
	10 <sup>-3</sup> -0,01	2
	0,01-1	3
	1-50	4
	50-500	5

la percolación vertical de contaminantes a través de la zona subsaturada, sin considerar su migración lateral en la zona saturada (Shrestha et al., 2017) y caracteriza esta vulnerabilidad en función de las siguientes variables (Tabla 4):

Cada una de estas variables está clasificada en tipos o clases (pudiendo ser tanto cuantitativas como cualitativas) con la correspondencia de cada una de ellas a una clasificación entre 0 y 1. El valor final de vulnerabilidad (índice GOD)



**Figura 3. Método GODS para la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos (tomado de Foster et al., 2002).**

**Tabla 4. Variables del método GOD (Foster e Hirata, 1988).**

G	Grado de confinamiento hidráulico del acuífero: tipo de acuífero
O	Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de infiltración
D	Distancia al agua determinada como la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados.

se obtiene a partir del producto de los 3 valores en cada pixel (Figura 3).

#### Método GOD-S

Este método se comporta como una modificación al método GOD, que incorpora el 'índice de susceptibilidad a la percolación del suelo' "S" basado en una clasificación del suelo en función de su textura (Figura 4).

#### Métodos DRASTIC y DRASTIC-P

Fueron desarrollados por Aller et al. (1987), siendo DRASTIC uno de los métodos más difundidos a nivel internacional para el estudio de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos, debido a su simplicidad tanto en el concepto como en la aplicación. DRASTIC-P es una variante donde, a partir de un cambio de ponderación en cuatro de sus variables, se ajusta para representar mejor la vulnerabilidad específica ante pesticidas (en términos genéricos).

Estas metodologías cuantifican la vulnerabilidad relativa por medio de una suma ponderada de siete variables que definen los principales factores que controlan el movimiento del agua subterránea dentro, a través y fuera de un área (Tabla 5, con modificaciones de Grondona, 2014). Los valores de cada variable (subíndice r) se normalizan en una escala de 1 a 10. Además, al valor de cada variable se aplica un índice de ponderación (subíndices w) entre 1 y 5. El cálculo del índice de vulnerabilidad (Di) se realiza según la siguiente expresión:

$$D_i = (D_r \cdot D_w) + (R_r \cdot R_w) + (A_r \cdot A_w) + (S_r \cdot S_w) + (T_r \cdot T_w) + (I_r \cdot I_w) + (C_r \cdot C_w)$$

Los valores Di obtenidos fueron clasificados por intervalos iguales en las 3 categorías de vulnerabilidad antes mencionadas (Tabla 2). Como el uso del suelo predominante en el área de estudio es agrícola, se consideró útil trabajar también con la metodología DRASTIC-P, en el cual se modifica el peso de tres de las variables: pendiente, tipo de suelo e impacto de la zona no saturada.

## RESULTADOS

### Índice de vulnerabilidad utilizando Ekv

Los criterios utilizados para clasificar las variables y su valoración, provienen de lo propuesto en la metodología original y se han vinculado a la geomorfología y litología dominantes (Tabla 6, Figura 5). El mapa final de vulnerabilidad obtenido a partir de la combinación de ambas variables se muestra en la Figura 6. Más del 75% del área de la cuenca se categoriza como de vulnerabilidad moderada.

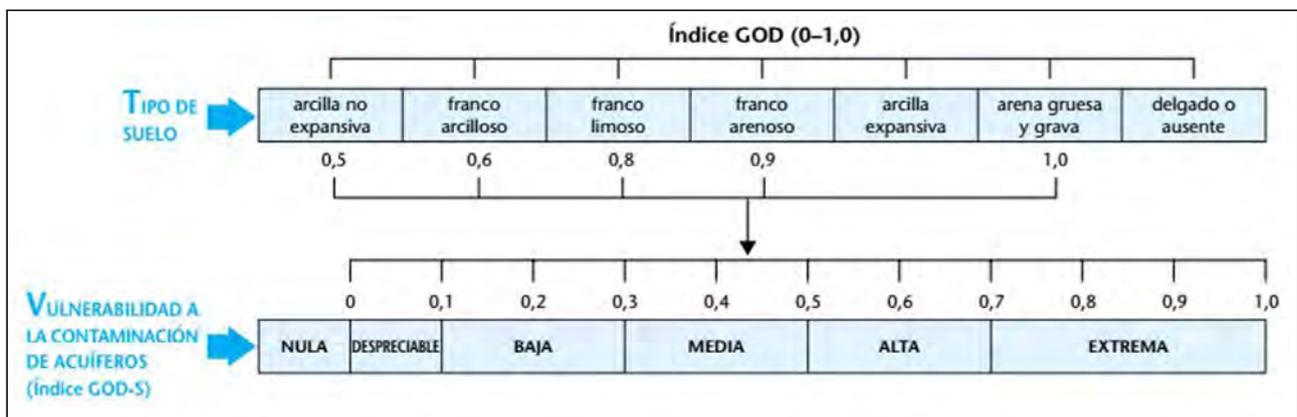
### Índice de vulnerabilidad utilizando GOD/GODS

Los criterios utilizados para clasificar las variables y valorarlos provienen de lo propuesto en la metodología original y se han vinculado a la geomorfología y litología dominantes. (Tabla 7, Figura 7).

Los mapas finales de vulnerabilidad obtenidos se muestran en la Figura 8; ambos métodos muestran una tendencia preferencial a valores bajos de vulnerabilidad, y a su vez los índices son muy homogéneos respecto a su distribución real: GOD con dos categorías con muy similar representación territorial: baja (51,8%) y moderada (48,2%), mientras que GODS resulta más homogéneo todavía, con un 96% del territorio en vulnerabilidad baja.

### Índice de vulnerabilidad utilizando DRASTIC/DRASTIC-P

Los criterios utilizados para clasificar las variables y valorarlos provienen de lo propuesto en la metodología original (Tabla 8, Figura 9). Los mapas finales de vulnerabilidad obtenidos se muestran en la Figura 10; ambos métodos resultan muy similares en cuanto a sus resultados, predominando las categorías baja y moderada; DRASTIC con un leve



**Figura 4. Variable "S" en el método GOD-S (tomado de Foster et al., 2002).**

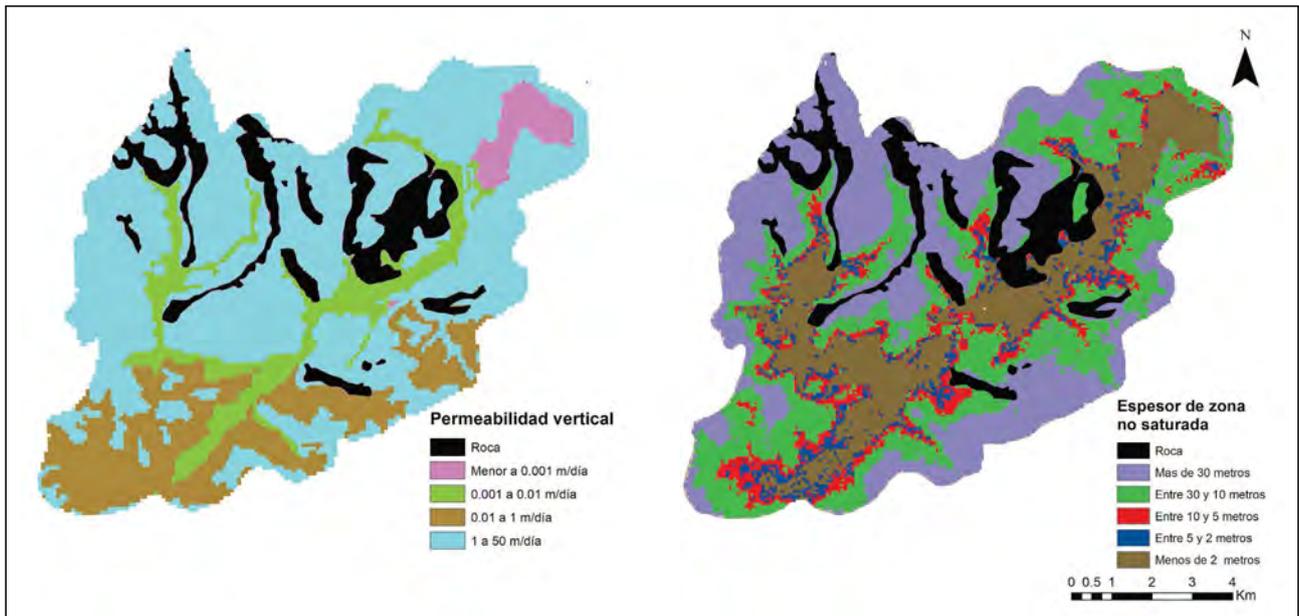


Figura 5. Mapas de parámetros utilizados para el índice Ekv.

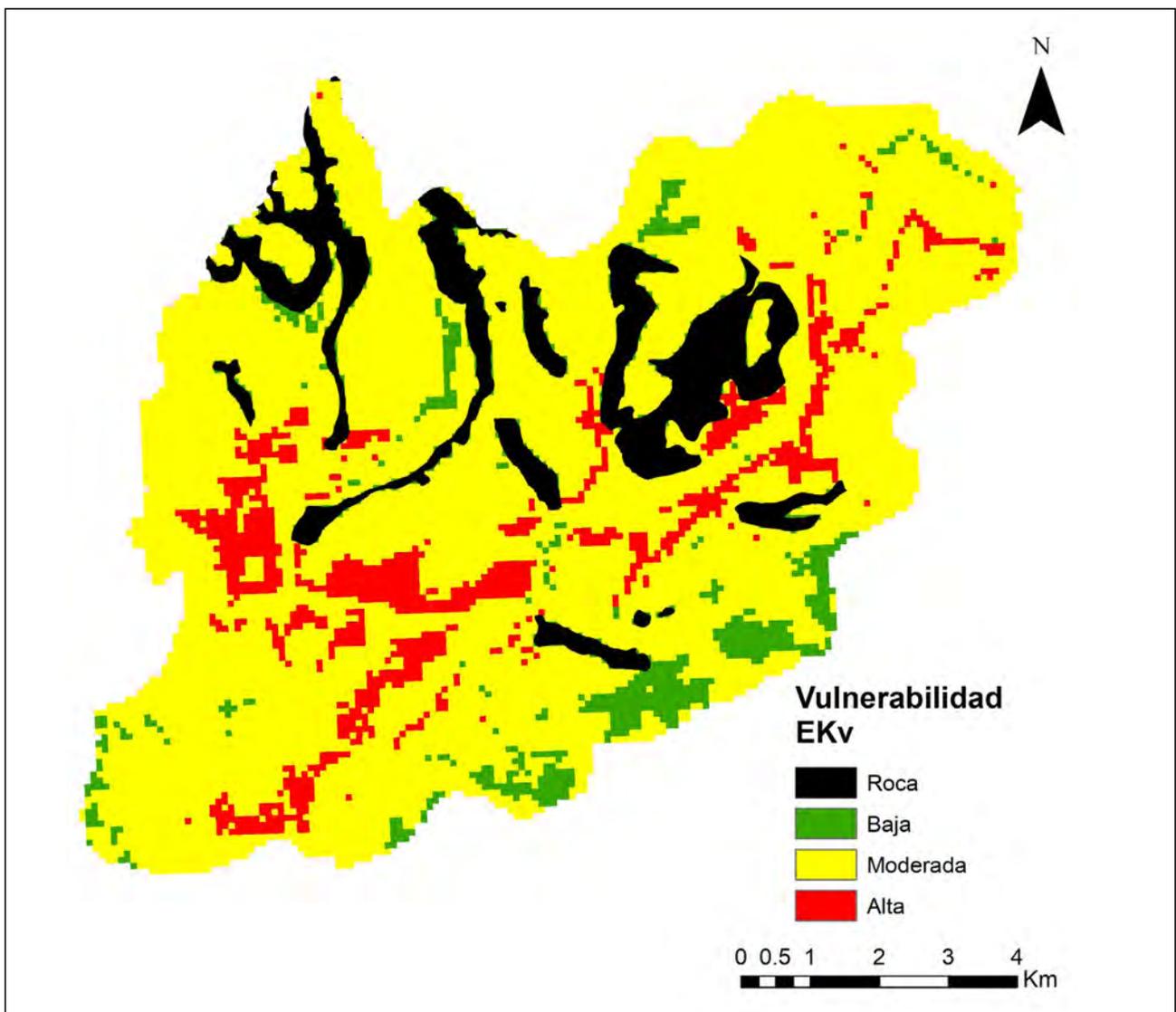


Figura 6. Vulnerabilidad del acuífero por método Ekv

Tabla 5. Variables, valores, ratings y pesos de las metodologías DRASTIC y DRASTIC-P

VARIABLE	CLASE	VALORACIÓN	PESO DRASTIC	PESO DRASTIC-P
D: profundidad del nivel freático (m)	0-1,5	10	5	5
	1,5-5	9		
	5-10	7		
	10-20	5		
	20-30	2		
	>30	1		
R: recarga neta (mm)	0-50	1	4	4
	50-100	3		
	100-180	5		
	180-255	8		
	>255	10		
A: naturaleza del acuífero	Lutita masiva	2	3	3
	Metamórfica/Ígnea	3		
	Metamórfica/ Ígnea meteorizada	4		
	Till glacial	5		
	Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	6		
	Arenisca masiva	7		
	Arena o grava	8		
	Basalto	9		
	Caliza kárstica	10		
S: naturaleza del suelo	Arcilla no compactada y no agregada	1	2	5
	cieno	2		
	Arcilla margosa	3		
	Limo margoso	4		
	Marga	5		
	Arenisca margosa	6		
	Agregado arcilloso o compactado	7		
	Arena	9		
	Grava	10		
	Delgado o ausente	10		
T: pendiente del terreno (%)	0-2	10	1	3
	2-6	9		
	6-12	5		
	12-18	3		
	> 18	1		
	Acuífero confinado	1		
I: impacto de la zona no saturada	Arcilla	3	5	4
	Lutita	3		
	Caliza	3		
	Metamórfica/Ígnea	4		
	Arenisca	6		
	Secuencias de arenisca, caliza y lutita	7		
	Arena y grava	8		
	Basalto	9		
	Caliza karstica	10		

**Tabla 5. Variables, valores, ratings y pesos de las metodologías DRASTIC y DRASTIC-P cont.**

	<4	1	3	2
	4-12	2		
C: conductividad hidráulica (m/día)	12-28	4		
	28-40	6		
	40-80	8		
	> 80	10		

**Tabla 6. Valoración de los parámetros del índice Ekv.**

VARIABLE	CLASE	VALOR ASIGNADO
E (m)	> 30 (lomas periserranas)	1
	30-10 (lomas)	2
	10-5 (llanura interserrana)	3
	5-2 (llanura de muy baja pendiente)	4
	> 2 (proximidades de laguna y arroyo)	5
Kv (m/día)	< 0,001 (arcillas limosas)	1
	0,001 a 0,01 (limos arcillosos)	2
	0,01 a 1 (limos)	3
	1 a 50 (limos arenosos)	4

**Tabla 7. Valoración de las variables de los índices GOD y GODS.**

VARIABLE	CLASE	VALOR ASIGNADO
G	Acuífero no confinado	0,8
O	Limo arenoso	0,8
	Limo	0,6
	Limo arcillo	0,3
D (m)	< 5	0,9
	5-20	0,8
	20-50	0,5
	> 50	0,3
S	Franco	0,75
	Franco arcilloso	0,6

predominio de baja (40,6% del área) y DRASTIC-P de moderada (50,1% del área).

En la Figura 11 se presenta un resumen de las áreas ocupadas por las distintas clases de vulnerabilidad según las metodologías utilizadas en el presente estudio. Se observa que las metodologías GOD y GODS son las que dan lugar a una mayor área con la categoría "baja vulnerabilidad", la metodología Ekv posee la mayor área bajo categoría "moderada vulnerabilidad" y las metodologías DRASTIC y DRASTIC-P son las únicas que muestran áreas bajo la categoría "alta vulnerabilidad". De la observación de los mapas finales de todas las categorías se puede destacar que las áreas de mayor vulnerabilidad coinciden con las zonas bajas de la cuenca, mientras que las zonas de menor vulnerabilidad se desarrollan por lo general, en las zonas más altas de la cuenca.

**Tabla 8. Valoración de las variables del índice DRASTIC y DRASTIC-P.**

VARIABLE	CLASE	VALOR ASIGNADO
D (m)	> 30	1
	20-30	2
	10-20	5
	5-10	7
	1,5-5	9
R (mm/año)	0-1,5	10
	100-180	6
A	Limos-limos arenosos	4
	Delgado o ausente	10
S	Franco arcilloso	3
	Franco	5
T (%)	> 18	1
	12-18	3
	6-12	5
	2-6	9
I	Limo arcilloso	2
	Limos	4
	Limo arenoso	6
C (m/día)	4-12	2

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La aplicación de las metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos en la zona de estudio permitió reconocer y sistematizar las variables requeridas en su proceso y, comparar los resultados obtenidos en los índices intrínseca y específica utilizados. Se obtuvo como primer resultado la Tabla 9, en la que comparan las potencialidades y limitaciones de cada metodología analizada.

El mapa resultante del método Ekv identificó más del 75% del área de estudio dentro de la categoría identificada como de vulnerabilidad moderada, esto resulta en reconocer a esta metodología como la menos restrictiva, expeditiva y apropiada para una evaluación básica de la vulnerabilidad específica del acuífero.

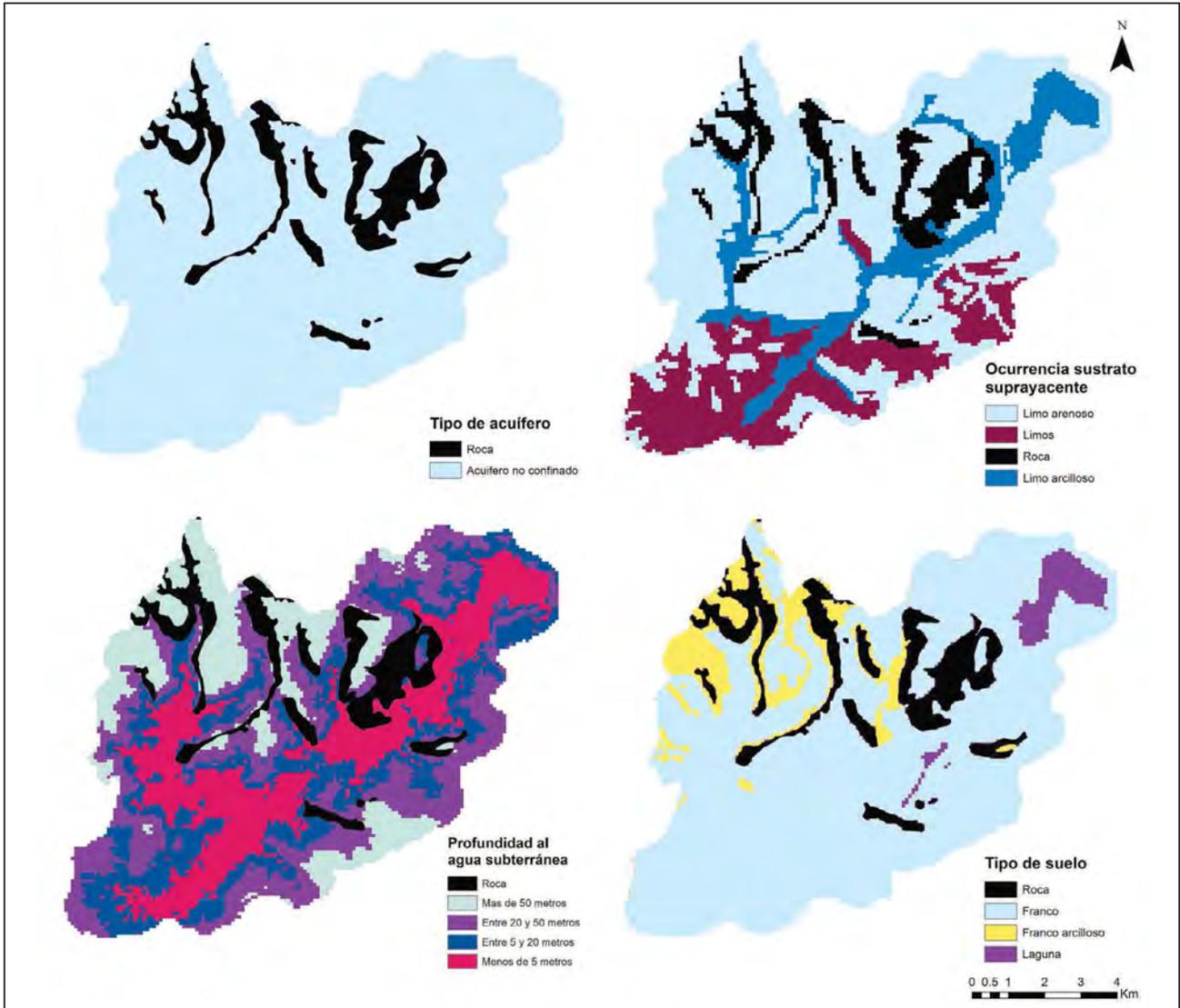


Figura 7. Mapas de parámetros utilizados para los índices GOD y GODS

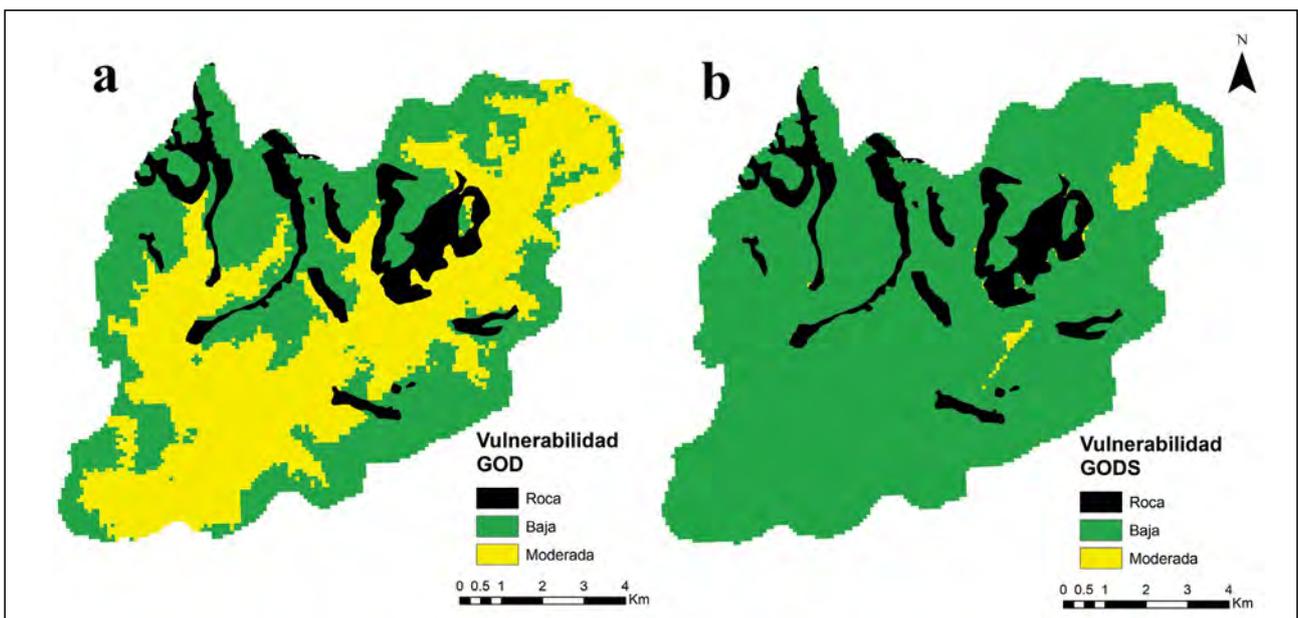


Figura 8. Vulnerabilidad del acuífero por: método GOD (a) y método GODS (b).

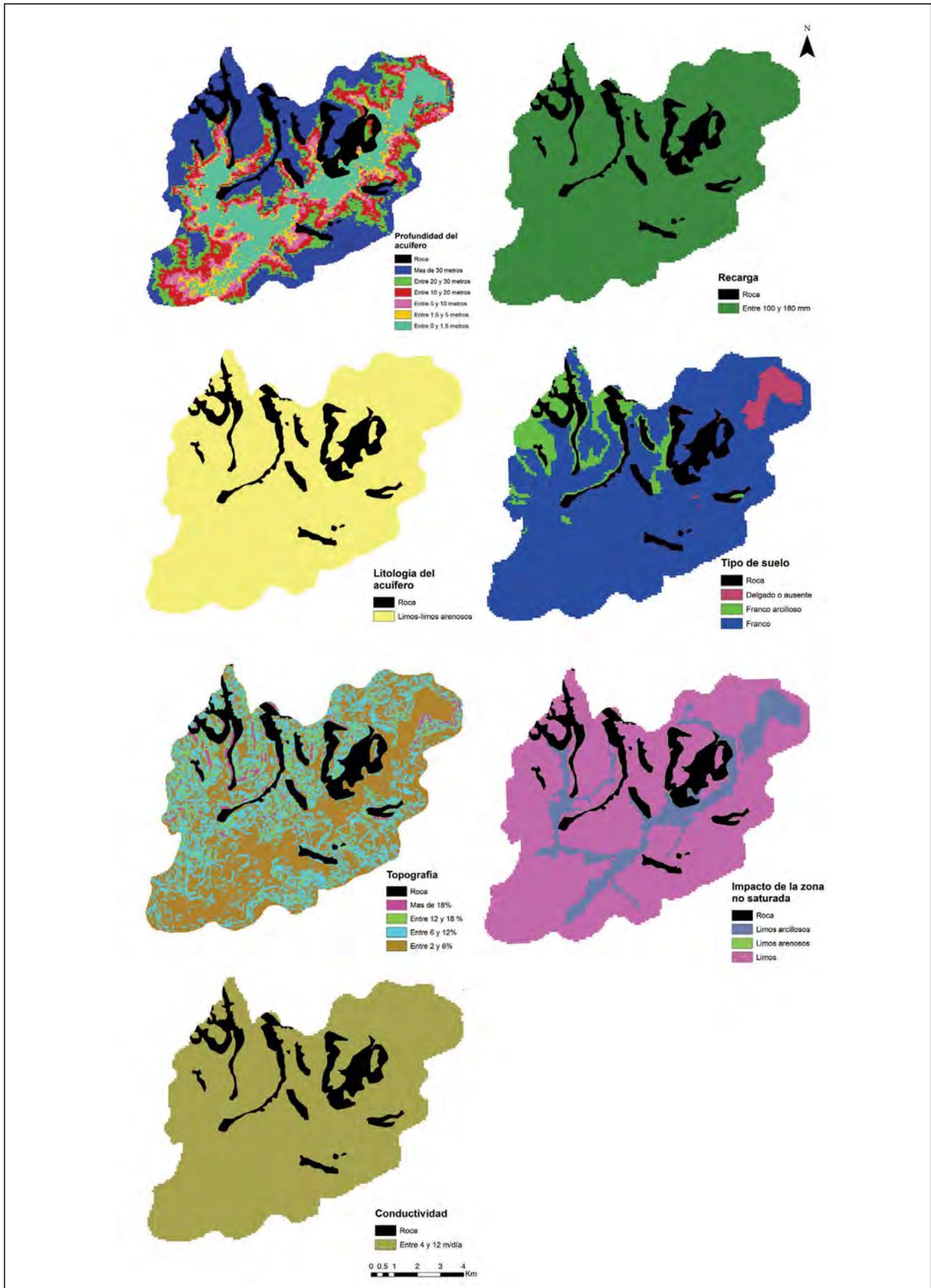


Figura 9. Mapas de parámetros utilizados para el índice DRASTIC

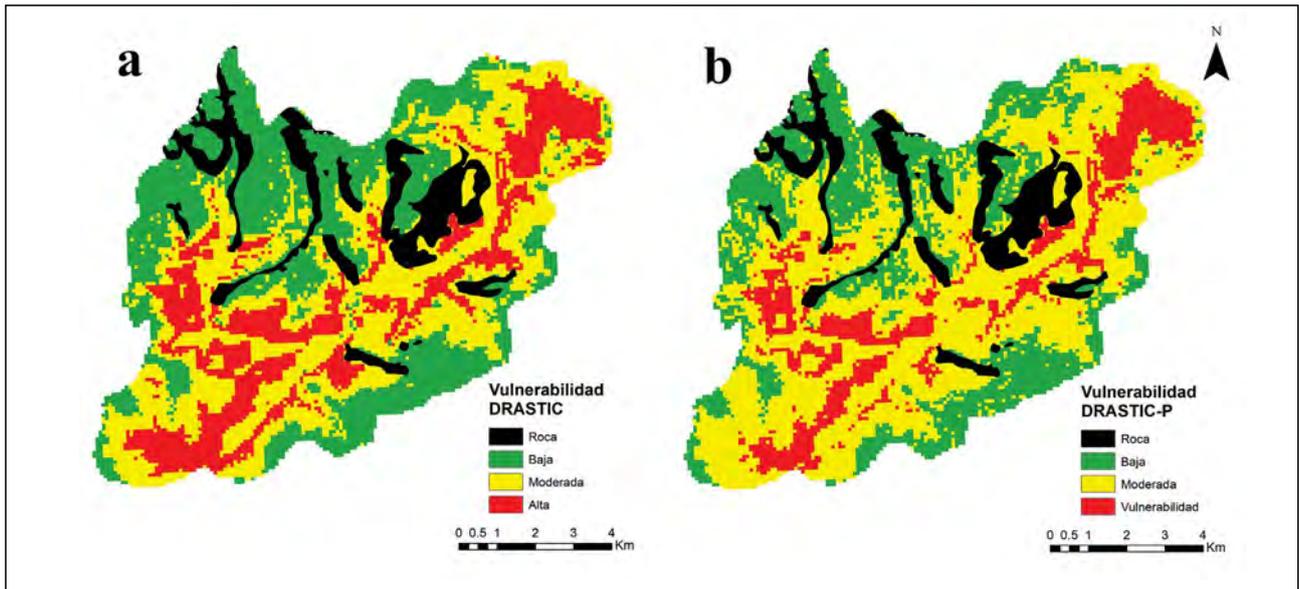


Figura 10. Vulnerabilidad del acuífero por el método DRASTIC (a) y DRASTIC-P (b)

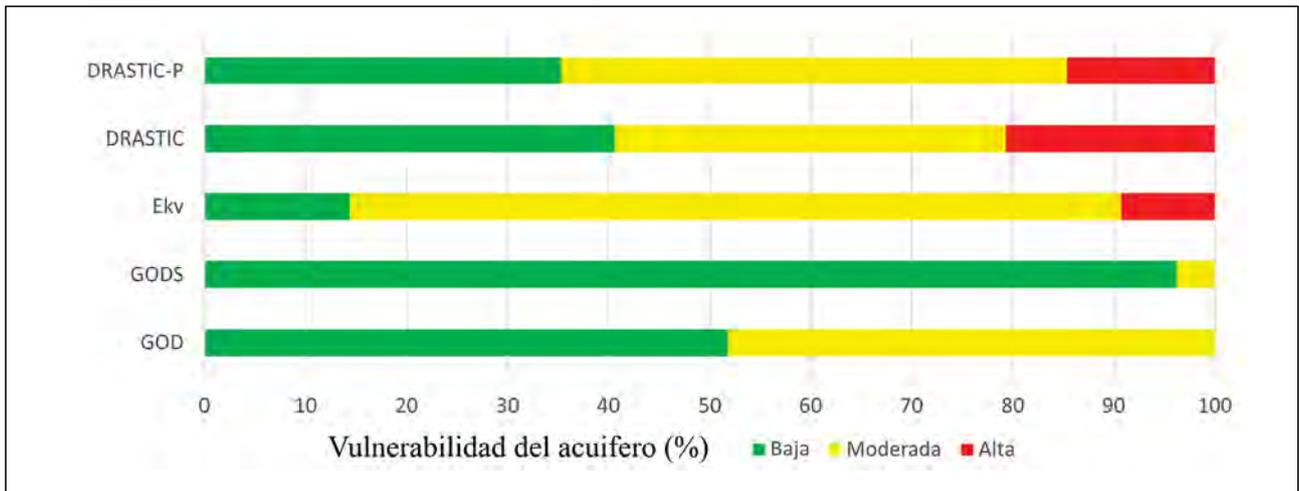


Figura 11. Comparación de las vulnerabilidades según las distintas metodologías empleadas.

GOD reconoce dos categorías de vulnerabilidad, moderada (48,2%) y baja (51,8%), mientras que GODS resulta más homogéneo todavía, con un 96% del territorio en vulnerabilidad baja. Ambos métodos resultan permisivos en cuanto a la toma de decisiones vinculadas al uso del suelo y muy homogéneos en cuanto a sus resultados. Si bien la clase moderada en ambos, ocupa un menor porcentaje de superficie con respecto al Ekv, generando menor incertidumbre, este último permitió visualizar las áreas con alta vulnerabilidad. Esto llevaría a considerar que esta metodología contribuiría a desarrollar políticas más conservadoras y restrictivas respecto a la protección del acuífero.

La metodología GOD-S, al considerar en la valuación de la vulnerabilidad, la capacidad que tiene un suelo de amortiguar el paso de un contaminante en función de su textura y contenido de materia orgánica, disminuye el porcentaje que ocupa la clase de vulnerabilidad moderada del método GOD y clasifica esas áreas dentro de la categoría baja, refinando notoriamente los índices resultantes.

Por su parte, el método DRASTIC emplea una mayor cantidad de variables que los anteriores, lo cual lo vuelve más robusto y más difícil de desarrollar. Sin embargo, al involucrar variables importantes en relación a la vulnerabilidad de acuíferos, el índice obtenido asegura resultados más confiables y cercanos a la realidad. Tanto DRASTIC como DRASTIC P, resultan métodos muy similares en cuanto a sus resultados, predominando las categorías baja y moderada; DRASTIC con un leve predominio de baja (40,6% del área) y DRASTIC-P de moderada (50,1% del área). Además, al obtener el índice de vulnerabilidad específica a la contaminación por fitosanitarios, permite contribuir a la identificación de aquellas zonas que requerirían mayor atención con respecto a esta problemática.

Lo expuesto deja en evidencia que los métodos DRASTIC y DRASTIC-P, a diferencia de Ekv, GOD y GOD-S, resultan de mayor utilidad para la toma de decisiones y el desarrollo de estrategias de uso del suelo y protección la calidad del agua subterránea, generando un mejor balance entre incer-

**Tabla 9. Potencialidades y restricciones de los métodos evaluados**

MÉTODO	POTENCIALIDADES	RESTRICCIONES
EKv	Utiliza solo dos variables	Una de las variables (Permeabilidad Vertical) presenta una alta homogeneidad para todo el acuífero, lo que contribuye a que el mapa resultado presente poca variabilidad espacial de las distintas categorías de vulnerabilidad. Predomina la categoría "moderada", de mayor incertidumbre que las otras dos.
GOD	Contempla la profundidad del acuífero (una de las variables más importante en acuíferos freáticos)	No contempla la variable alta vulnerabilidad y los resultados son también homogéneos territorialmente.
GODS	Incorpora la variable suelo	Entrega el más homogéneo de todos los resultados (categoría baja).
DRASTIC	Logra una muy buena discriminación territorial entre categorías	Es la metodología que más variables necesita para su desarrollo.
DRASTIC-P	Aumenta el peso de variables relacionadas a la contaminación por pesticidas Único método aplicado en el presente trabajo que evalúa la vulnerabilidad específica	A igual que la anterior, hace uso de un importante número de variables. Solo considera la carga contaminante relacionada al uso de fitosanitarios.

tidumbre y utilidad para la toma de decisiones.

El presente trabajo forma parte de los requerimientos que se establecen para acceder al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

y el análisis de datos fueron realizados por Liliana Viglianchino, Sebastian Grondona, Francisco Bedmar, Hernán Angelini y Héctor Massone. El primer borrador del manuscrito fue escrito por estos mismos autores, que posteriormente leyeron y aprobaron el manuscrito final.

### CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación

### DECLARACION DE CONFLICTOS DE INTERESES

El/los Autor/res declara/n que no existe algún conflicto de interés

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arregui, M., Grenón, D., Sánchez, D. y Ghione, J. (2013). Evaluación del riesgo de impacto ambiental de plaguicidas en cultivos anuales del centro de Santa Fe. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias*, 12(1/2), 13-22. <https://doi.org/10.14409/fa.v12i1/2.5114>
- Atucha, A., Lacaze, M. y Adlercreutz, E. (2018). Sector rural. En E. Adlercreutz (Ed.), *Segundo Informe de Monitoreo Ciudadano. Para saber qué ciudad queremos, necesitamos saber qué ciudad tenemos* (pp. 242-247). Red Mar del Plata Entre Todos.
- Auge, M. (1995). Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. Universidad de Buenos Aires. (Trabajo inédito).
- Auge, M. P. (2004). Hidrogeología Ambiental. Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, *Serie Contribuciones Técnicas, Ordenamiento Territorial N°5*, 131 pp. Buenos Aires. Recuperado de <http://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/82>
- Bedmar, F., Gianelli, V., Angelini, H. y Viglianchino, L. (2015). Riesgo de contaminación del agua subterránea con plaguicidas en la cuenca del arroyo El Cardalito, Argentina. *Revista de investigaciones agropecuarias*, 41(1), 70-82.
- Bocanegra, E. y Benavente, M. A. (1994). Simulación numérica del sistema de flujo de las aguas subterráneas en Mar del Plata, Argentina (período 1920-1969). En *II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea (Santiago, Chile)* (pp. 213-224).
- Bocanegra, E., Martínez, D., Massone, H. y Cionchi, J. L. (1993). Exploitation effect and saltwater intrusion in the Mar del Plata aquifer, Argentina. En *Proceedings of the XII Salt Water Intrusion Meeting* (Barcelona, España) CIMNE-UPC (pp. 177-191).
- ESRI (2012). ArcGIS Desktop: Release 10.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

- Foster, S. y Hirata, R. (1988). Groundwater pollution risk assessment: A methodology using available data. *WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual*, Lima, Peru. 81 pp.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., y Paris, M. (2002). Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. *World Bank, WMATE. Washington*, 101 pp.
- Foster, S., Hirata, R. y Andreo, B. (2013). El concepto de vulnerabilidad a la contaminación acuífera: ¿ayuda o impedimento para la promoción de la protección de las aguas freáticas? *Hydrogeology Journal*, 21, 1389-1392. <https://doi.org/10.1007/S10040-013-1019-7>
- Girardin, P., Bockstaller, C. y Der Werf, H. V. (1999). Indicators: Tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 13, 5-21.
- González, N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. En R. de Barrio, R. Etcheverry, M. Caballé y E. Llambías (Eds.), *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires, 16° Congreso Geológico Argentino, Relatorio* (pp. 359-374).
- Gustafson, D. I. (1989). Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 8, 339-357.
- Gutsche, V. y Rossberg, D. (1997). SYNOPSIS 1.1: a model to assess and compare the environmental risk potential of active ingredients in plant protection products. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 64, 181-188.
- Grondona (2014). Identificación de los factores y procesos que inciden en la presencia de Compuestos Orgánicos Persistentes (COPs) en el agua subterránea en la Cuenca del Río Quequén Grande. Aplicación en la gestión del recurso hídrico subterráneo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Higley, L. G. y Wintersteen, W. K. (1992). A novel approach to environmental risk assessment of pesticides as a basis for incorporating environmental costs into economic injury levels. *American Entomologist*, 38, 34-39.
- INTA. (2015). Cartas de suelo de la Provincia de Buenos Aires. Recuperado el 1 de septiembre de 2022 de <https://inta.gob.ar/documentos/carta-de-suelos-de-la-provincia-de-buenos-aires>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4. Recuperado el 2 de marzo de 2022 de <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J. y Tette, J. (1992). A method to measure the environmental impact of pesticides. *New York's Food and Life Sciences Bulletin*, 139, 1-8.
- Lu, C., y Tian, H. (2017). Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half-century: Shifted hot spots and nutrient imbalance. *Earth System Science Data*, 9, 181-192. <https://doi.org/10.5194/essd-9-181>.
- Margat, J. (1968). Vulnerabilite des nappes d'eau souterraine a la pollution: bases de la cartographie. *BRGM Publication 68-SGL 198*, Orleans, Francia.
- Martínez, G.A. y Cionchi, J.L. (1988). Morfometría e hipsometría en cuencas de drenaje de la mitad septentrional del partido de General Pueyrredon, provincia de Buenos Aires. *Actas II Jornadas Geológicas Bonaerenses (Bahía Blanca)* (pp. 153-161).
- Massone, H. y Martínez, D. (2008). Consideraciones metodológicas acerca del proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos. *Revista Ingenierías*, 7(12), 9-22.
- Massone, H.E. y Barilari, A. (2020). Groundwater pollution: a discussion about vulnerability, hazard and risk assessment. *Hydrogeology Journal*, 28, 463-466. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02090-0>
- OSSE (2010). Sistema de acueducto oeste de provisión de agua potable a la ciudad de Mar del Plata. Parte 1. Plan Director. Documento técnico Obras Sanitarias mar del Plata SE, inédito. 88 pp.
- Pullará, C. (2022). *Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Pampeano en el Partido de General Pueyrredón*. Tesis de Grado inédita. Facultad de Ingeniería, UFASTA.
- Rao, P. S. C., Hornsby, A. G. y Jessup, R. E. (1985). Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. *Soil and Crop Science Society of Florida*, 44, 1-8.
- Romanelli, A. (2012). *Evaluación ambiental de lagunas pampásicas del Sudeste Bonaerense. Diagnóstico y perspectivas de gestión sustentable*. Tesis Doctoral inédita. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata.

- Romanelli, A. (2012). Tesis Doctoral: Evaluación ambiental de lagunas pampásicas del sudeste bonaerense. Diagnóstico y perspectivas de gestión sustentable. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Sagardoy, J.A. (1993). An overview of pollution of water by agriculture. En: *Prevention of Water Pollution by Agriculture and Related Activities* (pp. 19-22). Actas de la Consulta de Expertos de la FAO, Water Report 1.
- Shrestha, G., Uchida, Y., Kuronuma, S., Yamaya, M., Katsuragi, M., Kaneko, S., Shibasaki, N. y Yoshioka, M. (2017). Performance evaluation of a ground-source heat pump system utilizing a flowing well and estimation of suitable areas for its installation in Aizu Basin, Japan. *Hydrogeology Journal*, 25(6), 1437-1450. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1536-x>
- Unesco. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. UNESCO, París. Recuperado el 12 de noviembre de 2022 de <https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/07/375751spa.pdf>
- Viglianchino, L. Okada, E., Bedmar, F., Massone, H., y Puricelli, M. (2021b). Uso de fitosanitarios en la producción hortícola: caso de estudio en el Cinturón Hortícola de Mar del Plata. En *41 Congreso Argentino de Horticultura (La Plata)* (p. 424).
- Viglianchino, L., Bedmar, F., Massone, H., Puricelli, M. y Okada, E. (2021a). Caracterización social, productiva y tecnológica del cinturón hortícola de Mar del Plata. En *41 Congreso Argentino de Horticultura (La Plata)* (p.340).
- Vrba, J. y Zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *IAH International Contributions to Hydrogeology*, 16. Heise Publicat

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 50 • 2023 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>  
Rossello, E.A. y Laprea-Bigott, M.  
Efecto de la fracturación en el muestreo petrofísico de núcleos para la estimación de porosidad y permeabilidad  
e012, <https://doi.org/10.59069/24225703e012>

# Efecto de la fracturación en el muestreo petrofísico de núcleos para la estimación de porosidad y permeabilidad

## Effect of fracturing on the petrophysical sampling of cores for the estimation of porosity and permeability

 Eduardo Antonio Rossello<sup>1</sup>   Marcelo Laprea-Bigott<sup>2</sup> 

\*Contacto

Recibido: 07 de agosto de 2023 ▪ Aceptado: 30 de octubre de 2023 ▪ Publicado: 16 de noviembre de 2023

### Resumen

Los muestreos petrofísicos son una herramienta esencial para determinar la porosidad y permeabilidad de una roca reservorio con el objetivo de comprender sus condiciones de almacenamiento, recuperación y productividad de los fluidos que contiene, y así evaluar el potencial económico de un proyecto exploratorio. Sin embargo, el tamaño limitado de los diferentes tipos de núcleos condiciona la verdadera validez de sus determinaciones cuando se extrapolan al resto del yacimiento. La limitación mecánica en la extracción de núcleos (*plugs-tapones*) en áreas litológicas sin fracturas no logra reflejar el comportamiento del conjunto rocoso. Los resultados de porosidad y permeabilidad obtenidos de mediciones de laboratorio, al caracterizar solo las condiciones de la roca indeformada, son significativamente inferiores a los valores del conjunto cuando se incorpora la contribución de las fracturas. En este estudio, se investiga la influencia de la fracturación en el muestreo petrofísico de litologías heterogéneas de núcleos para la determinación de la porosidad y permeabilidad en rocas reservorio. Se analiza cómo las fracturas pueden afectar las mediciones petrofísicas y cómo esto puede impactar la precisión de las estimaciones de porosidad y permeabilidad en la evaluación de los yacimientos. Los resultados obtenidos proporcionan información petrofísica valiosa para mejorar las técnicas de muestreo en áreas con presencia de fracturas para la mejor caracterización de los reservorios y una toma de decisiones más informada en la industria del petróleo y gas. **Palabras clave:** núcleos litológicos, estudios petrofísicos, fracturas, reservorios naturalmente fracturados.

### Abstract

Petrophysical sampling is an essential tool to determine the porosity and permeability of a reservoir rock in order to understand its storage conditions, recovery and productivity of the fluids it contains, and thus assess the economic potential of an exploratory project. However, the limited

1 Instituto de Geociencias Básicas (IGEBBA) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN), Universidad de Buenos Aires

2 Texas A&M University (TAMU), Harold Vance Department of Petroleum Engineering, College Station, Texas, TX 77843, Estados Unidos

size of the different types of cores conditions the true validity of their determinations when they are extrapolated to the rest of the reservoir. The mechanical limitation in the extraction of cores (plugs) in lithological areas without fractures fails to reflect the behaviour of the rock group. The porosity and permeability measurements obtained from laboratory samples, when only the undeformed rock is considered are significantly lower than the overall values when the contribution of fractures is incorporated. In this study, the influence of fracturing in the petrophysical sampling of heterogeneous lithologies of cores for the determination of porosity and permeability in reservoir rocks is investigated. We discuss how fractures can affect petrophysical measurements and how these can impact the accuracy of porosity and permeability estimates in reservoir evaluation. The results obtained provide valuable petrophysical information to improve sampling techniques in areas with the presence of fractures for better characterization of reservoirs and more informed decision making in the oil and gas industry.

**Keywords:** lithological cores, petrophysical studies, fractures, naturally fractured reservoirs.

## INTRODUCCIÓN

En la fase de prospección de recursos hidrocarburíferos las empresas del sector utilizan métodos indirectos para caracterizar el subsuelo, entre ellos se destacan principalmente tecnologías de levantamientos magnéticos, gravimétricos y sísmicos para establecer estructuras detalladas de yacimientos y la construcción de modelos 3D del subsuelo, registros de pozos, y pruebas de pozos para determinar las características de yacimientos potenciales y la presencia de fallas y sellos (Schlumberger 1987; Kubik y Lowry 1993; Serra 2008; Bratton et al. 2006; Laongsakul y Dürrast 2011).

A través del análisis petrofísico de las muestras de rocas obtenidas de los sondeos, los ensayos de laboratorios realizados sobre estos materiales proporcionan información fundamental sobre la litología, porosidad, permeabilidad, saturación de fluido y otras propiedades para ayudar a los operadores a caracterizar mejor la naturaleza y el potencial económico del yacimiento (Friedman 1967; Amaefule et al. 1988; Zoback 2006; Fjær et al. 2008). De este modo, se puede construir un modelo petrofísico de un reservorio, donde se determinan las características particulares de los fluidos in-situ, y las capacidades productivas y de almacenamiento particularmente distintivas. Este proceso es multidisciplinario y consiste en la generación, interpretación, calibración e integración de la información geológica y de ingeniería.

Estas determinaciones petrofísicas son fundamentales para el desarrollo de yacimientos naturalmente fracturados (Warren y Root 1963; Saidi 1987; Nelson 2001; Aguilera 1995) y son esenciales para analizar las oportunidades de explotación mediante el modelaje utilizando herramientas de simulación, que permitan analizar escenarios y optimizar la producción de manera económicamente beneficiosa. El objetivo de este trabajo es discutir consideraciones teóricas y prácticas de importancia para analizar y validar los resultados de los estudios realizados en núcleos, si no se tienen en cuenta las metodologías de su muestreo.

## EL MUESTREO DE LOS NÚCLEOS

Las muestras de rocas obtenidas generalmente como cilindros denominados según la modalidad de diferentes re-

giones latinoamericanas como núcleos, testigos o corazones proporcionan los datos esenciales para la realización de las actividades de exploración, evaluación y producción de yacimientos de petróleo y gas porque permiten que los geocientíficos examinen directamente las secuencias depositacionales y así obtener evidencias directas de la presencia de un sistema petrolífero que reúna características potencialmente económicas (Anderson 1975; Tiab y Donaldson 2004). Además, proporcionan información sobre la distribución y capacidad de producción de hidrocarburos y permiten revelar rasgos del yacimiento que podrían no haber sido detectados a través de las mediciones derivadas de los registros de pozo (Ekstrom et al. 1987; Serra 2008).

Se pueden obtener los siguientes tipos de núcleos de rocas para determinar las propiedades petrofísicas de los reservorios:

a) Los núcleos enteros de fondo de pozo, también denominados núcleos enteros o núcleos convencionales, que se obtienen durante el proceso de perforación utilizando una barrena especial de extracción de núcleos. Las longitudes y diámetros de los núcleos son diversos, habitualmente, el diámetro de los núcleos oscila entre 4,45 y 13,3 cm (1,75 y 5,25 pulgadas) y, en general, se perforan en segmentos de 10 m (30 pies), que se corresponden con la longitud del tubo extractor de núcleos o de su camisa.

b) Los núcleos de pared del pozo que se obtienen con un dispositivo de muestreo a percusión utilizándose pequeñas cargas explosivas para hacer penetrar en la formación los tubos extractores de núcleos individuales denominados balas. El Sistema es operado con cable, que se baja generalmente en el pozo cuando está por concluirse una operación de perfilaje con cable en agujero descubierto y tienen tamaños de aproximadamente 2,86 a 4,45 cm (1,125 a 1,75 pulgadas) de largo por 1,75 a 2,54 cm (0,688 a 1 pulgadas) de diámetro. También, pueden extraerse núcleos rotativos de la formación que pueden triplicar el tamaño de las anteriores utilizándose una barrena diminuta de extracción de núcleos orientada en sentido horizontal que puede perforar núcleos de 6,4 cm (2,5 pulgadas) de largo por 3,8 cm (1,5 pulgadas) de diámetro desde la pared del pozo.

c) Los núcleos o "tapones" (*plugs*) que se extraen en el

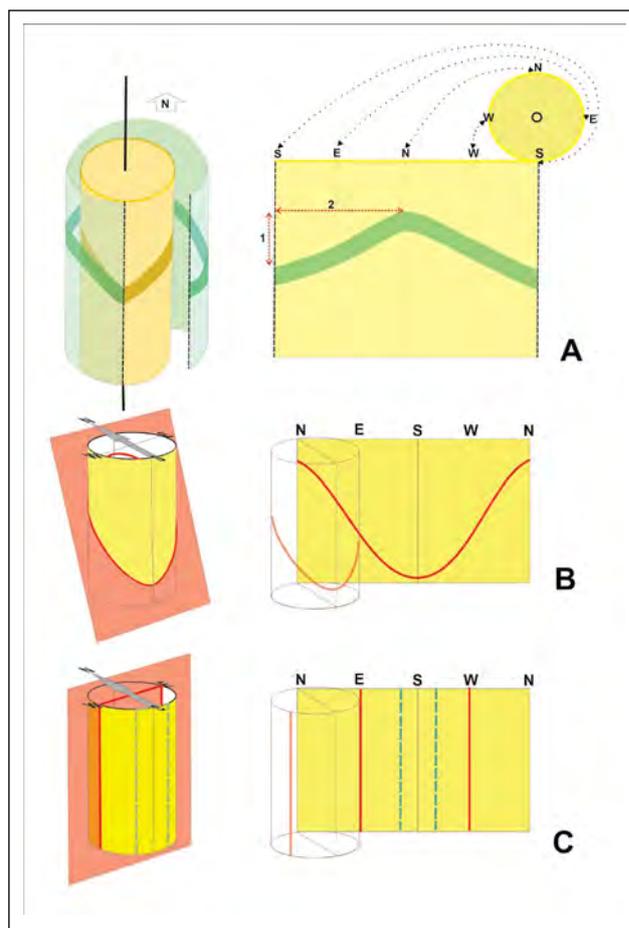
laboratorio de segmentos de un núcleo entero se obtienen como una submuestra representativa del núcleo entero y resultan útiles para el análisis de intervalos de un núcleo relativamente homogéneo. En los yacimientos convencionales, estos núcleos se extraen en forma rutinaria en intervalos de 0,30 m (1 pie) a lo largo del núcleo y miden, aproximadamente, 6,40 cm de largo por 2,54 o 3,80 cm de diámetro.

Los laboratorios de análisis de núcleos con frecuencia, además de las determinaciones petrofísicas estándar, ofrecen una diversidad de servicios adicionales, tales como; el servicio de adquisición de registros tomográficos de rayos gamma (Golf-Racht 1982; Miquel González et al. 2017), mediciones de la presión capilar, la permeabilidad relativa, las propiedades eléctricas, el daño de formación, el tiempo de relajación de resonancia magnética nuclear (RMN), el factor de recobro, la mojabilidad y otros parámetros utilizados para la calibración de los registros.

Las variaciones de la litología pueden requerir intervalos de muestreo más pequeños, pero si el núcleo es muy heterogéneo, como se observa en los carbonatos vacuolares o fracturados, o en los intervalos de areniscas y lutitas finamente laminados, el operador puede optar por analizar el núcleo entero en vez de muestras. Mediante la medición y el análisis de la porosidad, la permeabilidad y la saturación de fluidos, basados en muestras de núcleos, los operadores pueden caracterizar mejor los sistemas porosos de las rocas y modelar con mayor precisión el comportamiento de los yacimientos para optimizar la producción (Andersen et al. 2013). Sin embargo, la utilidad de la información extraída de los núcleos depende en parte de la escala, del tamaño y volumen del núcleo los cuales controlan los tipos de análisis que pueden efectuarse, las condiciones de preservación y transporte desde su obtención hasta el momento de los ensayos y de las condiciones termobarométricas del ensayo. Esto es fundamental para escalar los resultados obtenidos al resto del volumen rocoso con capacidad de almacenar y permitir el flujo de los fluidos, lo cual se reflejará en el análisis de la economía del prospecto.

Para registrar espacialmente la descripción de los rasgos estructurales del núcleo se puede apelar a la técnica de enrollar una lámina transparente que permita el copiado directo de todas las estructuras que se expresan sobre su superficie (Stearns y Friedman 1972). Luego, al desenrollar la lámina se obtienen de manera muy accesible los datos de lo que se denomina esquema desplegado para luego montarlos en gráficos y/o programas para su tratamiento (Figura 1A).

Un plano oblicuo inscripto en un núcleo (e.g., fractura, estratificación, etc.) se expresa sobre el esquema desplegado como por curva sinusoidal (Figura 1B), en cambio, los planos subverticales y/o paralelos al eje del núcleo se mostrarán como dos líneas subparalelas separadas 180° (Figura 1C). Conocida la posición del corazón se puede estimar la inclinación de los planos con respecto al eje del sondeo, de modo manual mediante simples relaciones trigonométricas sabiendo el diámetro del núcleo y valor de la amplitud de



**Figura 1. A:** Esquemas de la adquisición de rasgos estructurales sobre las superficies cilíndricas de un núcleo a partir técnicas de enrollamiento. **B:** Expresión de un rasgo oblicuo cuando tienen un ángulo con respecto al eje del cilindro. **C:** Expresión de rasgo paralelo cuando son paralelos al eje del cilindro.

la sinusoide. De este modo, resulta un medio práctico para confirmar o corregir los valores obtenidos por los registros del pozo haciendo correlaciones con los datos obtenidos en los núcleos.

### Propiedades petrofísicas de los reservorios

Para que las rocas reservorios tengan potencial comercial, deben exhibir dos propiedades esenciales:

- Capacidad de almacenamiento de fluidos, que viene determinada por su porosidad.
- Capacidad para transmitir fluidos al pozo, descrita por su permeabilidad absoluta.

Sin embargo, estas propiedades pueden no permanecer constantes durante toda la vida útil del yacimiento debido a los posibles efectos de compresibilidad. Además, la capacidad de un fluido particular para fluir en un reservorio en un sistema con presencia de dos o tres fluidos (gas, petróleo, agua) está controlado por la interacción entre los

fluidos. Estos efectos de permeabilidad relativa también son una función de la historia de saturación del reservorio.

La porosidad ( $\phi$ , ecuación 1) se define como el volumen de espacios vacíos ( $V_p$ ) en relación al volumen total de la roca ( $V_t$ ), y se estima en % (véanse detalles y definiciones en Cone y Kersey 1993; Ganat 2020). La roca-reservorio ( $V_t$ ) está conformada por espacios porosos encerrados por un marco rocoso, el cual consiste en granos de roca ( $V_{grain}$ ) y materiales de cementación que conforman la matriz.

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_{grain}}{V_t} \quad (1)$$

La porosidad, se puede determinar a través de cálculos basados en registros o núcleos de pozos (Mazzullo y Chilingarian 1992). Estos métodos permiten evaluar la capacidad del yacimiento para almacenar fluidos y su potencial como recurso comercial. La porosidad puede ser primaria, obtenida originalmente por su ambiente deposicional o predeposicional, o secundaria, adquirida con posterioridad por fenómenos diagenético o deformacionales.

La permeabilidad absoluta determina la capacidad de los espacios porosos interconectados para permitir el flujo de fluido. Este concepto fue investigado por Darcy mientras estudiaba el movimiento del agua a través de un conjunto de partículas de arena (Craft et al. 1991). Como resultado de sus investigaciones, Darcy desarrolló una ecuación que describe el flujo laminar de un fluido completamente saturado de un único fluido a través de un medio poroso. Esta ecuación proporciona una comprensión fundamental del flujo de fluidos en medios porosos. La permeabilidad es una propiedad imprescindible de la roca-reservorio, lo cual es favorable para la planificación de la producción de pozos estableciendo la variación vertical y lateral de la calidad del yacimiento de hidrocarburos (Klinkenberg 1941; Rushing et al. 2004; Tiab y Donaldson 2004). Ésta determina la relación entre la veloci-

dad y el gradiente hidráulico, que da origen al flujo de fluidos a través del medio poroso.

La ley de Darcy es un principio fundamental en el campo de la hidrogeología y la dinámica de fluidos que describe el flujo de fluidos a través de medios porosos. Proporciona una relación matemática entre el caudal del fluido, las propiedades del medio poroso y el gradiente hidráulico. La ecuación generalizada de Darcy, mostrada en la Figura 2 y en la ecuación 2, es expresada en términos de velocidad de flujo ( $v$ ).

A partir de sus experimentos, variando la longitud ( $L$ ) y el diámetro de la columna, el material poroso que contiene y los niveles de agua en los depósitos de entrada y salida, concluyó que la tasa de flujo o el volumen de agua o el caudal volumétrico que pasa por unidad de tiempo,  $Q$ , (medido en metros cúbicos por segundo o galones por minuto) a través de una columna de arena de longitud  $L$  y área de sección transversal constante,  $A$ , es proporcional al área de la sección transversal,  $A$  de la columna (generalmente medida en metros cuadrados o pies cuadrados), proporcional a la diferencia en las elevaciones del nivel del agua,  $h_1$  y  $h_2$ , en los depósitos de entrada y salida de la columna, respectivamente, e inversamente proporcional a la longitud de la columna,  $L$  (medida en unidades consistentes en metros o pies). El término,  $\Delta h/\Delta s = h_2 - h_1 / s_2 - s_1$ , es el gradiente hidráulico, que representa el cambio en la altura hidráulica (altura de presión) por unidad de distancia a lo largo de la trayectoria del flujo.

$$v = -K * \text{grad } h \quad (2)$$

$K$  es la conductividad original de Darcy, (se mide en unidades como metros por segundo o pies por día), velocidad ( $v$ ) = conductividad ( $K$ ) x gradiente ( $\text{grad } h$ ). La ecuación 3 se deriva al considerar el valor promedio del gradiente de aceleración de la gravedad,  $g$ , (aproximadamente  $9.81 \text{ m/s}^2$ ) y la resistencia al flujo del fluido que satura la roca, expresada mediante la viscosidad del fluido,  $\mu$ . La viscosidad en unidades de centipoise (cP) la cual es una medida de la viscosidad

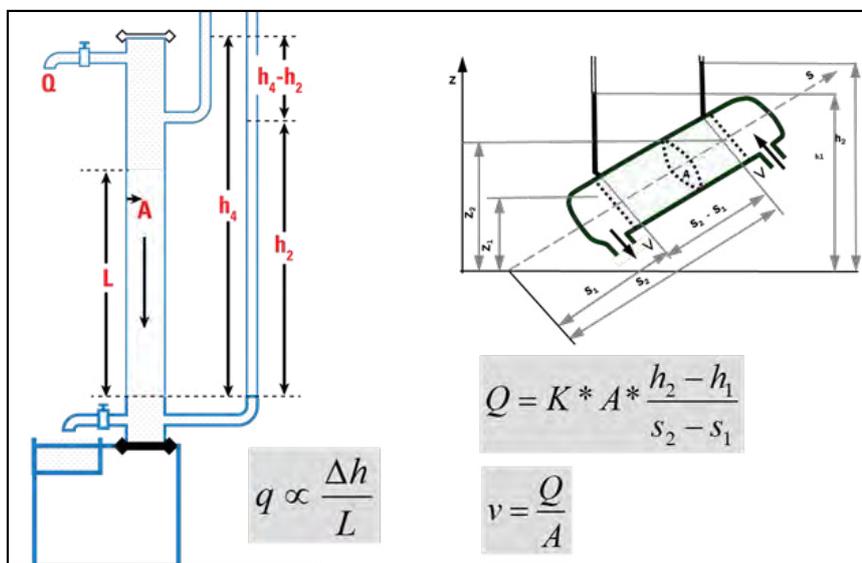


Figura 2. Henry Darcy investigó el flujo de agua en un filtro o columna de arena vertical, saturado y homogéneo (lado izquierdo de la figura), (tomado de Laprea-Bigott 2023).

dinámica de un fluido. En el sistema internacional de unidades (SI), la viscosidad dinámica se mide en pascal-segundo (Pa·seg). Por lo tanto, para realizar un análisis dimensional y encontrar la equivalencia, se aplica la siguiente relación:  $1 \text{ centipoise (cP)} = 0.001 \text{ pascal-segundo (Pa·seg)}$ . en el sistema cegesimal de Unidades:  $1 \text{ poise} \equiv 1 \text{ g}^{-1} \equiv 1 \text{ dina}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2} \equiv 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{seg}$ , es decir, equivale a una fuerza de 1 dina por  $1 \text{ cm}^2$ , generada por una diferencia de velocidad de  $1 \text{ cm}\cdot\text{seg}$ , en un espacio de  $1 \text{ cm}$ .

$$K = \frac{\rho * g}{\mu} * k \quad (3)$$

En la figura 2, la ley de Darcy establece que la velocidad de flujo ( $Q$ ) de un fluido a través de un medio poroso es directamente proporcional a la conductividad hidráulica ( $K$ ) del medio, el área de la sección transversal ( $A$ ) a través de la cual fluye el fluido y el gradiente hidráulico ( $\Delta h/\Delta s$ ).

Darcy concluyó en forma de ecuación:

$$q = \frac{K A (h_1 - h_2)}{L} \quad (4)$$

En la ecuación de Darcy, la constante de proporción "K", se determinó como una combinación de:

$k$ , permeabilidad del empaque de arena (o roca), y  
 $\mu$ , viscosidad del líquido

$$K = \frac{k}{\mu} \quad (5)$$

La unidad de permeabilidad primaria es el "Darcy" (figura 3). Muskat (1937) propuso llamar a esta unidad "Darcy" en honor al ingeniero hidráulico francés Henry Darcy (1803 – 1858) quien describió por primera vez el flujo de agua a

través de filtros de arena. Una permeabilidad de 1 Darcy se define como aquella permeabilidad que permite el flujo de  $1 \text{ cm}^3/\text{s}$  de un fluido con una viscosidad de 1 Cp a través de un área de sección transversal de un centímetro cuadrado de  $1 \text{ cm}^2$  bajo un gradiente de presión de  $1 \text{ atm}/\text{cm}$  (Figura 3).

La forma general de la Ley de Darcy introduciendo el efecto de la gravedad:

$$v_s = -\frac{k}{\mu} \frac{d\Phi}{ds} \quad (6)$$

Donde  $\Phi$  es el Potencial de Hubbert que se refiere al gradiente de presión a lo largo de la dirección del flujo del fluido y en sistemas de yacimientos, ese gradiente de presión puede ser influenciado por una variedad de fuerzas como la capilaridad, la viscosidad y la gravedad (ecuación 7).

$$v_s = -\frac{k}{\mu} \frac{d\Phi}{ds} = -\frac{k}{\mu} \left[ \frac{dp}{ds} - \frac{\rho g}{1.0133 \times 10^6} \frac{dz}{ds} \right] \quad (7)$$

Donde en la ecuación 7:

$v_s$  = Velocidad a lo largo de la trayectoria, s, cm/seg

$k$  = Permeabilidad absoluta, Darcies

$dp/ds$  = Gradiente de presión a lo largo de la trayectoria de flujo, s, atm/cm

$\rho$  = Densidad del fluido en movimiento, g/cm<sup>3</sup>

$g$  = Aceleración debido a la gravedad, 980 cm/seg<sup>2</sup>

$dz/ds$  = Gradiente de profundidad vertical, cm/cm

La permeabilidad es una propiedad de la roca para transmitir fluidos. Como tal, es una propiedad derivada (como la resistividad eléctrica). La permeabilidad no se puede medir en ausencia de flujo. Se considera que los fluidos

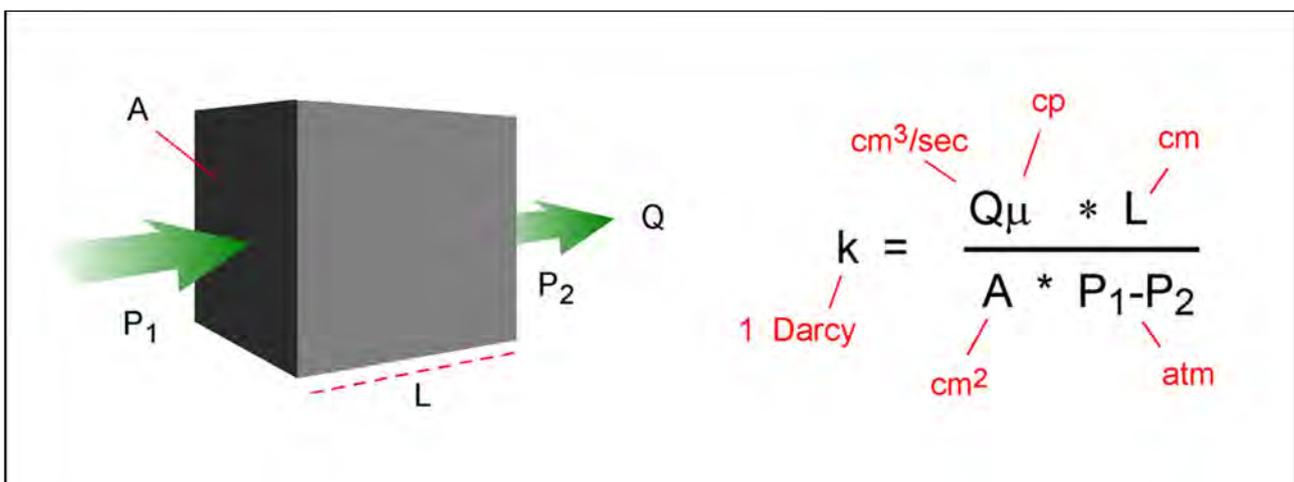


Figura 3. Esquema del cálculo de permeabilidad ( $k$ ) de un medio según un área ( $A$ ) a lo largo de una distancia ( $L$ ), a partir de un fluido ( $Q\mu$ ) con presiones de entrada ( $P_1$ ) y salida ( $P_2$ ).

que ocupan los espacios porosos no son químicamente reactivos con los materiales que constituyen la roca reservorio ni con los materiales de cementación.

En las mediciones de laboratorio, el valor estimado de la permeabilidad de la roca varía de manera inversamente proporcional a la viscosidad del fluido utilizado. Por lo tanto, la permeabilidad determinada utilizando un permeámetro de hidrocarburos líquidos será menor que la determinada utilizando gases en las mediciones. Este fenómeno, conocido como efecto Klinkenberg, se debe al tamaño reducido de las moléculas de gas y se manifiesta cuando se mide la permeabilidad de una roca o un medio poroso utilizando un gas, como el nitrógeno o el helio, en lugar de un líquido, como el agua o el petróleo. Cuando los gases se mueven a través de los poros de la roca, las moléculas de gas interactúan de manera diferente con las superficies de los poros en comparación con los líquidos. Esto da como resultado una aparente permeabilidad mayor cuando se utiliza un gas en lugar de un líquido para la medición.

De acuerdo con las fases de los fluidos almacenados en el medio poroso, la permeabilidad se puede clasificar en:

- **Permeabilidad absoluta (K):** Cuando existe un único fluido o fase que satura completamente el medio poroso.
- **Permeabilidad efectiva (Ke):** Cuando existe más de una fase en el medio poroso y fluyen simultáneamente; por ejemplo, un yacimiento de gas (k<sub>g</sub>)-agua(k<sub>w</sub>)-, petróleo(k<sub>o</sub>)-agua(k<sub>w</sub>) o gas(k<sub>g</sub>)-petróleo(k<sub>o</sub>)-Agua(k<sub>w</sub>).

Las ecuaciones 8 y 9 muestran las relaciones de las diferentes variables de las propiedades y características de la roca y de los fluidos, donde el caudal estimado es directamente proporcional a los valores de permeabilidad de cada una de las fases e inversamente proporcional a las correspondientes viscosidades de los fluidos.

$$q_w = -\frac{0.001127k_w A}{\mu_w} \left( \frac{dp_w}{dL} + 0.433\gamma_w \sin \theta \right) \quad (8)$$

$$q_o = -\frac{0.001127k_o A}{\mu_o} \left( \frac{dp_o}{dL} + 0.433\gamma_o \sin \theta \right), \quad (9)$$

Donde:

A es el área transversal medida perpendicularmente a la dirección del flujo (ft<sup>2</sup>);

θ es el ángulo de inclinación del lecho (grados);

L es la longitud del sistema de flujo (ft);

q<sub>w</sub> y q<sub>o</sub> son las tasas de flujo o el caudal para las fases de agua y petróleo, respectivamente (RB/D);

k<sub>o</sub> es la permeabilidad efectiva al petróleo (md);

k<sub>w</sub> es la permeabilidad efectiva al agua (md);

μ<sub>o</sub> es la viscosidad del petróleo (cp);

μ<sub>w</sub> es la viscosidad del agua (cp);

γ<sub>o</sub> y γ<sub>w</sub> son las gravedades específicas del petróleo y del agua, referidas al agua en fracción

- **Permeabilidad relativa (Kri):** Es la relación entre la permeabilidad efectiva y la permeabilidad absoluta (ecuación 6). Esta permeabilidad es función de la saturación de los fluidos que intervienen en la roca. Entonces, la permeabilidad relativa será igual a 1 si existe un solo fluido.

$$Kri = Ke / K \quad (10)$$

Los factores petrofísicos que afectan la permeabilidad de las rocas son, en gran medida, los mismos que afectan su porosidad. En diferentes muestras de reservorios con litologías silicoclásticas y carbonáticas, la relación logarítmica de la permeabilidad de la roca es directamente proporcional a su porosidad (Figura 4).

Entre los factores que afectan la permeabilidad se encuentran los siguientes:

- **La presión de las capas suprayacentes,** también conocida como presión de sobrecarga o enterramiento, se refiere a la sobrecarga que ejerce el peso de los estratos superiores sobre los inferiores (Rossello 2017). A medida que aumenta esta presión, la permeabilidad disminuye, ya que por el peso los estratos sobre las rocas reducen el tamaño de los poros por efecto del confinamiento haciendo entonces más dificultoso el recorrido del fluido que desea fluir a través de

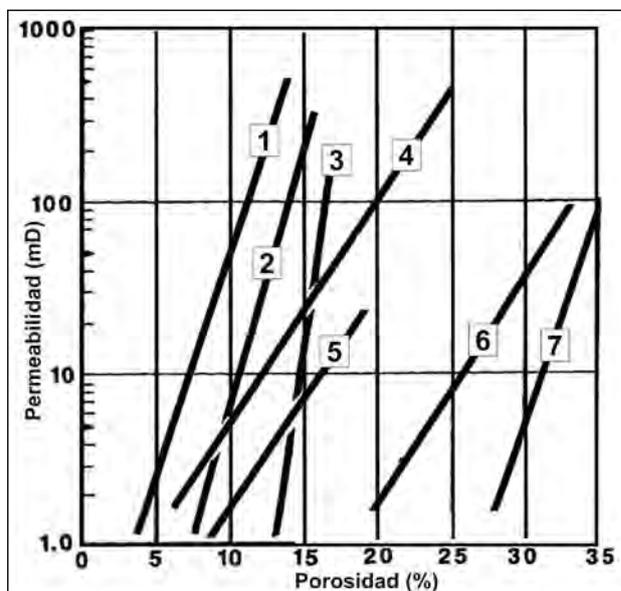


Figura 4. Esquema de la relación logarítmica de permeabilidad vs. porosidad a partir de datos obtenidos en el laboratorio. 1: Caliza de arrecife. 2: Caliza oolítica. 3: Arenisca dura bien cementada. 4: Dolomita sacarósica y caliza cristalina. 5: Caliza y dolomita intercrystalina. 6: Caliza margosa. 7: Arena friable de grano fino (modificado de Tiab y Donaldson, 1996, tomado de Poston y Laprea-Bigott 2023).

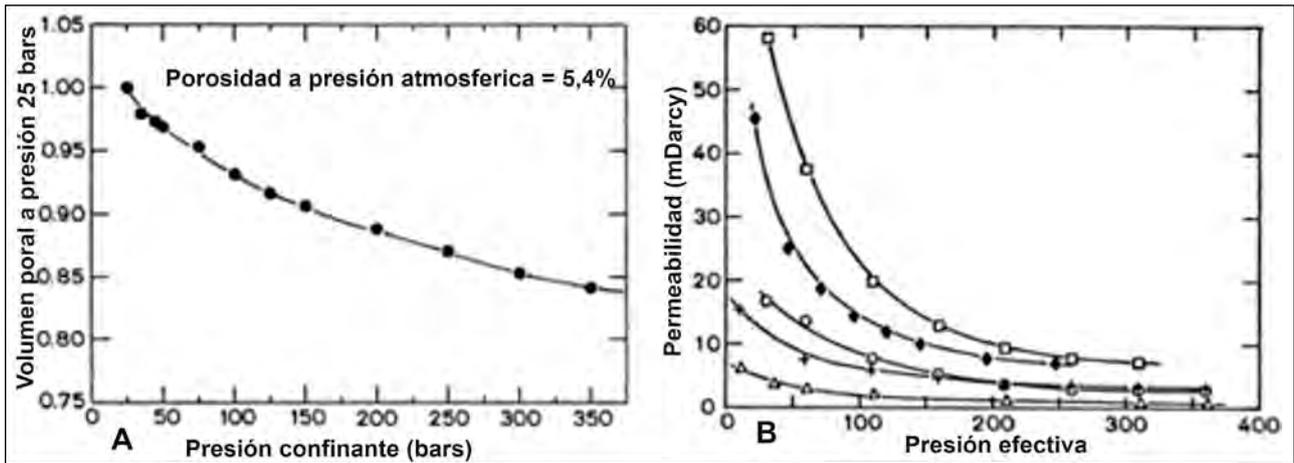


Figura 5. Ejemplos de reducción de la porosidad y permeabilidad por efectos de la presión confinante (tomado de Rosello 2017, modificado de Bjorlykke 2014).

la formación (Figura 5).

- **La forma y tamaño de los granos:** Mientras más seleccionados y homogéneos estén los granos de la roca, es decir, mientras su tamaño y forma sean semejantes, mayor será la porosidad y por ende la permeabilidad. Pero si existen granos de diferentes tamaños la permeabilidad se verá reducida ya que los espacios vacíos entre los granos más grandes se verán obstruidos por los granos más pequeños que constituyen su matriz, lo cual provocará que el fluido no pueda fluir con facilidad.

- **Daño a la formación:** La permeabilidad se puede ver afectada por los daños ocurridos en la formación durante los procesos de perforación. Por una parte, puede ocurrir una fracturación que amplía los canales porosos y por otro lado si llega a ocurrir una pérdida de los lodos de circulación favorecida por una sobrepresión los ripios y demás sustancias (como espesantes, dispersantes, etc.) se introducen obstruyendo los espacios vacíos haciendo que la permeabilidad disminuya.

Los dos primeros factores impactan a mayor escala sobre la porosidad y permeabilidad del macizo rocoso. En tanto el tercer factor tiene un efecto más local que impacta mucho en el aprovechamiento del yacimiento.

La permeabilidad al igual que la porosidad tiene un papel fundamental en la producción de hidrocarburos, ya que es una propiedad que indica cuánto fluido puede fluir a través del medio poroso con la finalidad de poder explotarlo y obtener la mayor producción de manera rentable económicamente. Una buena permeabilidad contribuye con las demás propiedades que determinan la presencia de hidrocarburo para evaluar de la manera más eficiente el comportamiento y potencial del yacimiento a la hora de la planificación y explotación de los pozos (Figura 6).

#### Yacimientos Naturalmente Fracturados (YNF)

Se define un yacimiento naturalmente fracturado (YNF) al que contiene fracturas creadas por la naturaleza y que tienen un efecto positivo o negativo en el flujo de fluidos que

contienen sus niveles de reservorio (Ehlig-Economides et al. 2000). Las fracturas abiertas y no cementadas o parcialmente mineralizadas pueden tener un efecto positivo en el flujo de petróleo y negativo debido a efectos de conificación de agua y gas. Por otra parte, las fracturas completamente mineralizadas, pueden crear barreras de permeabilidad para todo tipo de flujo. De este modo, se generan compartimientos que pueden llevar a recobros marginales y no viables económicamente.

Los yacimientos naturalmente fracturados se encuentran desarrollados en todo tipo de litologías, areniscas, carbonatos, lutitas, cherts, limolitas, rocas de basamento y carbones. Bratton et al. (2006) clasifican a estos tipos de reservorios teniendo en cuenta la interacción existente entre las contribuciones de porosidad y permeabilidad, tanto del sistema de fracturas, como del sistema de matriz (Figura 7).

- **Tipo 1:** Las fracturas proveen la conductividad esencial del yacimiento y su capacidad de almacenamiento. Este tipo de reservorios tienen áreas de drenaje extensas y sólo requieren de la perforación de algunos pozos para el desarrollo del campo; tienen tasas de producción iniciales muy altas, tasas de declinación rápidas, irrupción de agua temprana y dificultad en la determinación de reservas.

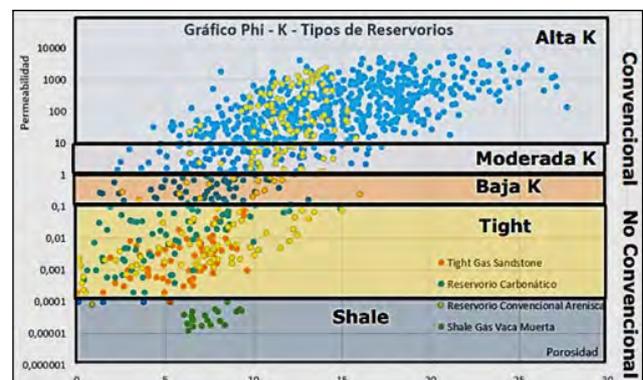
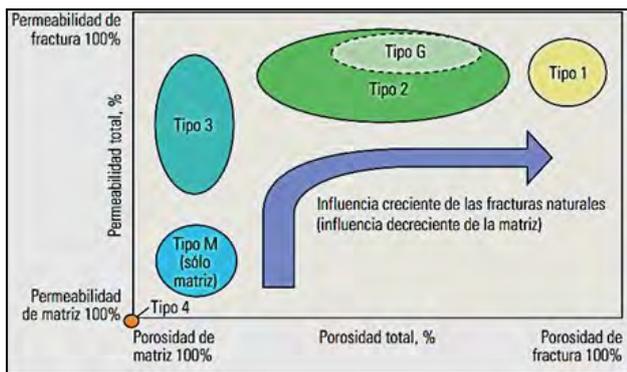


Figura 6. Relaciones de porosidad vs. permeabilidad para diferentes tipos de reservorios (modificada de Naidés 2000).



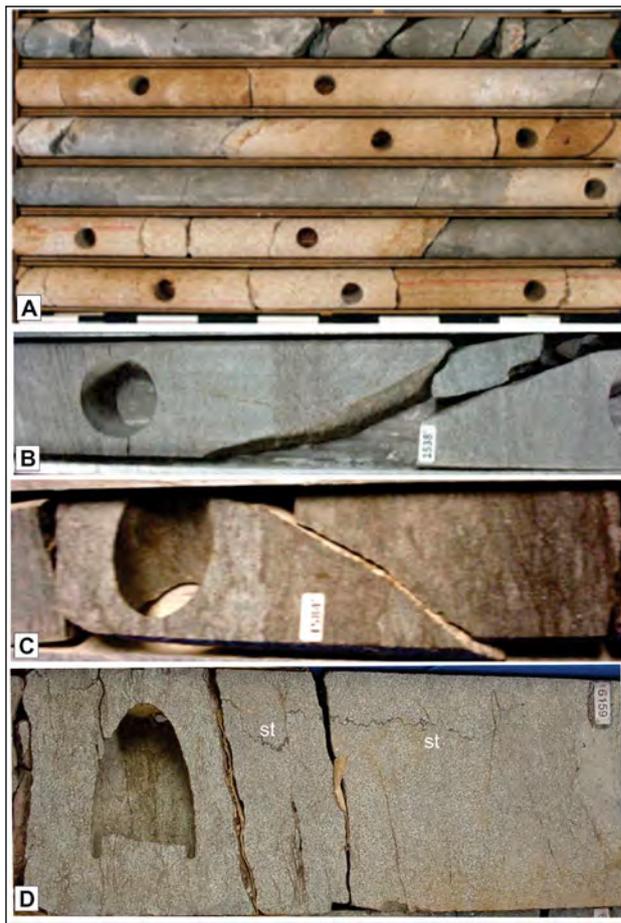
**Figura 7. Tipos reservorios (modificado de Bratton et al. 2006, a partir de Nelson 2001).**

- **Tipo 2:** Las fracturas proveen toda la conductividad del yacimiento y la matriz provee todo el almacenamiento. La matriz es lo suficientemente permeable para dar conductividad para el flujo desde la matriz hasta las fracturas. Este tipo de yacimientos puede tener tasas iniciales muy elevadas para una permeabilidad de matriz baja y puede tener dificultades durante el recobro secundario si la comunicación entre la matriz y las fracturas es pobre.
- **Tipo 3:** El sistema de fracturas y matriz proveen la conductividad del yacimiento, pero toda la capacidad de almacenamiento depende primordialmente de la matriz.
- **Tipo 4:** Las fracturas no son conductivas debido al proceso de mineralización secundario (selladas con minerales). El sistema de fracturas no tiene permeabilidad. La matriz provee la conductividad y el almacenamiento del reservorio.
- **Tipo G:** Ha sido creado especialmente para yacimientos no convencionales de gas como los de metano de niveles carbonosos (*Coal Bed Methane, CBM*), y reservorios fracturados de gas condensado.
- **Tipo M:** Toda la conductividad y el almacenamiento provienen de la matriz.

## RESULTADOS

Los muestreos petrofísicos que se practican en los laboratorios sobre los núcleos obtenidos en los pozos se realizan sobre fragmentos de los mismos luego de su formateo y preparación para incorporarlos a los diferentes dispositivos de análisis. Por esta razón, se realizan aserrados con la finalidad de obtener una muestra compacta en una pieza con un volumen regular establecido por las normas del procedimiento realizando cortes mediante sierras perpendiculares al eje del núcleo. También, se obtienen muestras de núcleos (*plugs-tapones*) a partir de una herramienta circular de corte que los obtiene de las paredes de los núcleos de fondo de pozo según espaciamientos que dependen de la variabilidad litológica, o incluso, los compromisos contractuales.

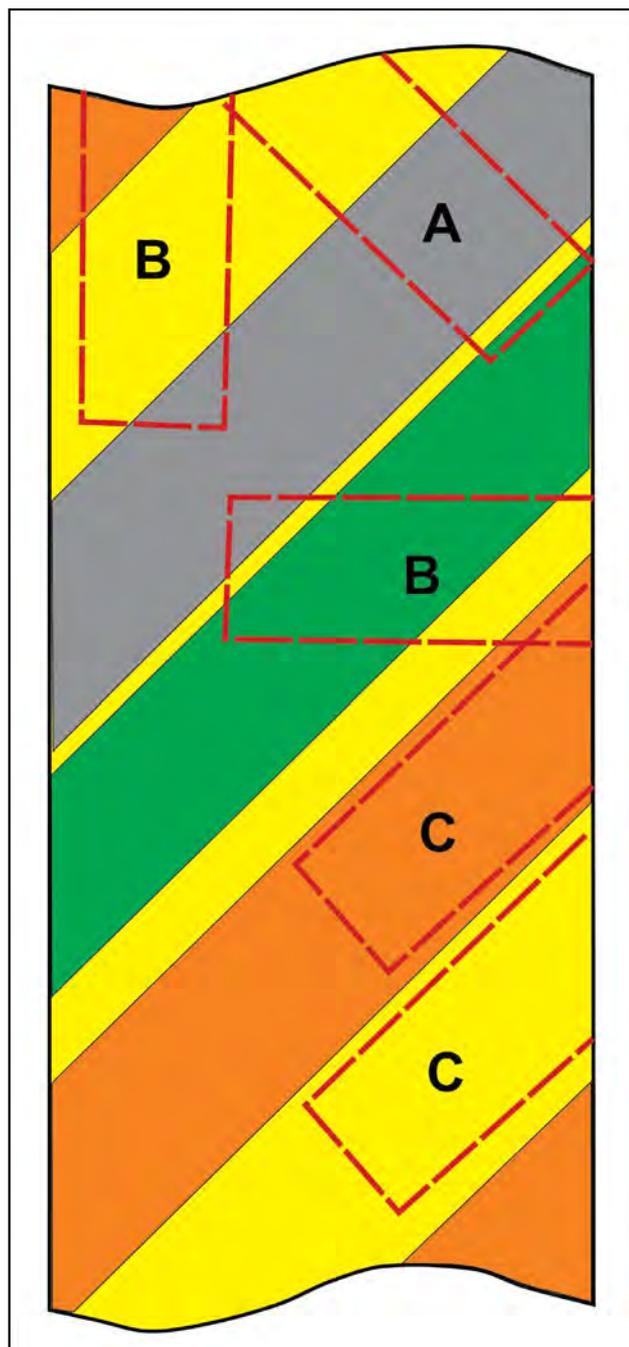
Independientemente del tipo de los muestreos y de la naturaleza de las litologías, las muestras que se obtienen evitan siempre las fracturas para obtener núcleos cilíndricos



**Figura 8. Vistas de ejemplos de tramos de núcleos con niveles areniscosos fracturados donde ha sido obtenido un núcleo (plug) para definir los parámetros de porosidad y/o permeabilidad. A: caja de núcleos areniscosos segmentados. B: núcleos paralelos a la estratificación de una arenisca con fracturas importantes. C: núcleos de sedimentita silicoclástica con variación de granulometría y fracturados. D: núcleos de niveles margosos con estilolitas (st) y fracturas subparalelas a la estratificación. Nótese que los datos proporcionados por estos muestreos no son representativos de las características petrofísicas del conjunto de los tramos adyacentes ni de las fracturas y/o estilolitas asociadas.**

y compactos (Figura 8). En estos ejemplos de muestreos de núcleos provenientes de distintos campos petroleros localizados en cuencas subandinas de Colombia los resultados de porosidad y permeabilidad obtenidos de ensayos de laboratorio resultaron muy conservadores con respecto a los volúmenes de hidrocarburos producidos. De modo general, se puede estimar un incremento real de la porosidad in situ equivalente a un 10 a 20% de la obtenida en el laboratorio. En el caso de la permeabilidad, el incremento ha sido muy superior ya que el laboratorio estimó valores de escasos mD que no conciden con la productividad que produjeron sus reservorios.

Otra característica que incide en la validez de los resultados de los análisis de laboratorio es la orientación de los núcleos sobre todo en litologías no homogéneas mul-



**Figura 9.** Ejemplos de la orientación de la toma de núcleos (tapones) en función de las diferentes posiciones y características reológicas de las anisotropías. **A:** muestreo dispuesto ortogonalmente a las litologías involucradas con diferentes reologías **B:** muestreo dispuesto oblicuamente a las anisotropías con diferentes potencias aparentes. **C:** muestreo indica una sola litología.

ticomposicionales. De este modo, en litologías con marcadas anisotropías el volumen que el núcleo tiene capacidad de muestrear puede determinar resultados absolutamente diferentes dependiendo de su orientación. Por un lado, el resultado de permeabilidad es híbrido porque involucra diferentes litologías con porcentajes variables en función de la orientación (Figura 9A, B). También, puede no ser represen-

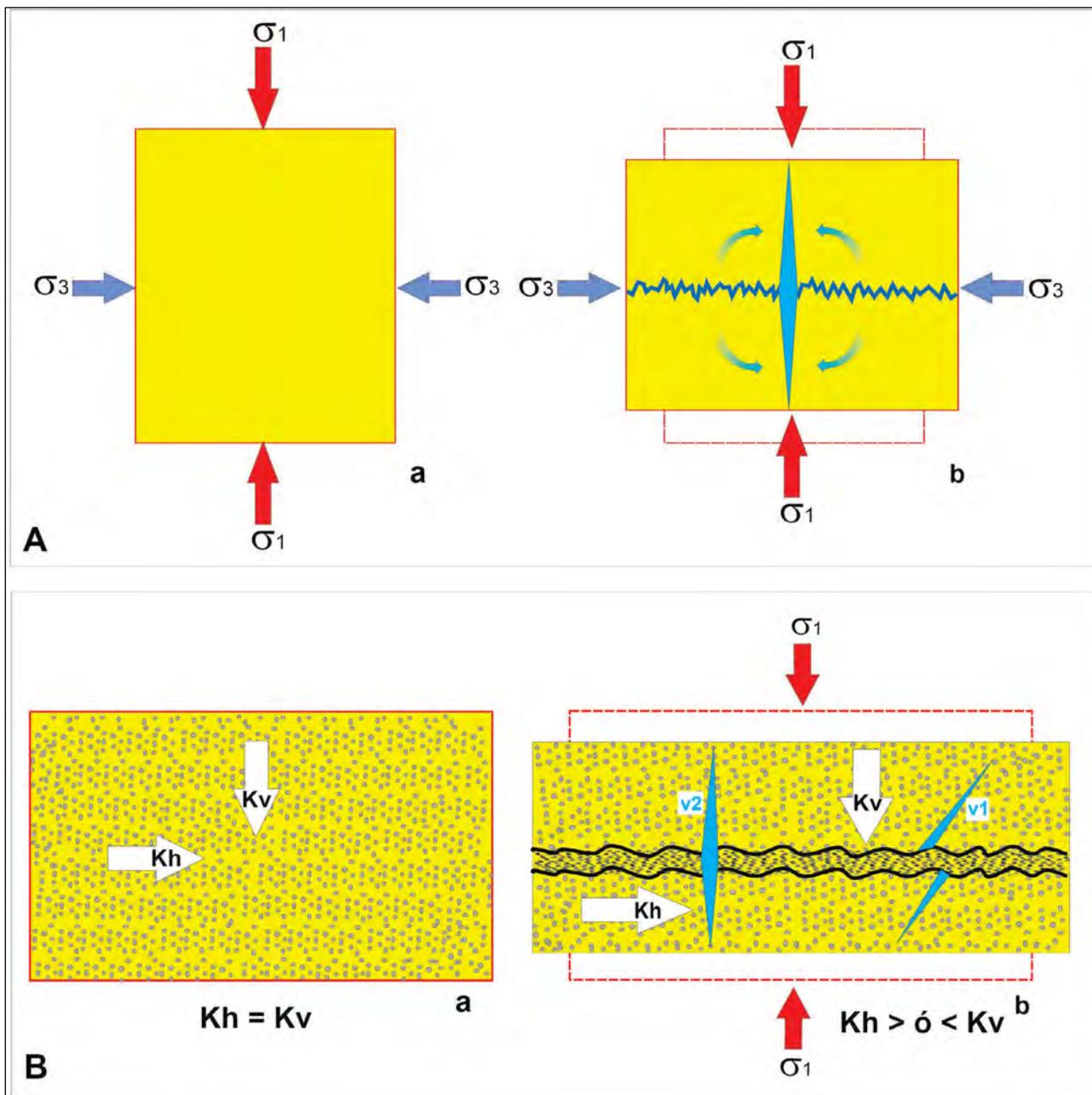
tativo si el volumen muestreado se restringe a un solo tipo de litología de una secuencia con múltiples características (Figura 9C).

En el caso de litologías que desarrollan anisotropías tanto primarias (estratificación, laminación, etc.), como adquiridas en la diagénesis y/o deformación, pueden desarrollar estilolitas por disolución por compresión en calizas, areniscas y/o evaporitas. El material disuelto por solución por presión es nuevamente precipitado en venas dispuestas perpendicularmente en sus cercanías (Figura 10A). En estos casos, donde el desarrollo de estilolitización es importante, la permeabilidad perpendicular o subparalela a la anisotropía podrán determinar resultados muy diferentes. Debido a la formación de superficies estilolíticas ocurre un enriquecimiento de la acumulación de materiales insolubles como las arcillas que determinan mayores dificultades de los fluidos para que las atraviesen (Figura 10B). Por esta razón, los valores de permeabilidad pueden diferir considerablemente en función de la orientación de los núcleos con respecto a las estilolitas.

A partir de determinaciones de laboratorio Heap et al. (2018) consideran que la anisotropía de permeabilidad que se desarrolla en el macizo rocoso debido a la presencia de estilolitas sedimentarias hace que parezca que las estilolitas actúan como barreras para el flujo de fluidos, y puede explicar la discrepancia entre las mediciones de laboratorio y las observaciones a escala de campo. Este enfoque puede proporcionar estimaciones de la permeabilidad equivalente y la anisotropía de la permeabilidad para los yacimientos de calizas que contienen estilolitas.

Según diferentes autores (e.g., Amaefule et al. 1988; Aguilera 1995; Ahmed 2006; Bjorlykke, 2014), las dimensiones de las fracturas se las diferencia en macrofracturas y microfracturas, donde las primeras corresponden a una fractura de más de 100 micrones de ancho y gran longitud (decenas o cientos de metros). En cambio, una microfractura, también conocida como fisura, es considerada como una fractura de longitud y anchura limitada al menor espesor de una capa, entendiendo el término capa como un intervalo homogéneo e "isotrópico mecánicamente", separado por una discontinuidad, y un ancho menor de 100 micrones. En ocasiones, las microfracturas pueden formar redes hidrodinámicamente muy similares a un medio poroso.

La frecuencia de fracturas es dependiente de las discontinuidades que produce la estratificación y laminación de las capas involucradas, de modo que cuando es más intensa es más alta la frecuencia y viceversa (Figura 11A). También, la potencia de la capa involucrada determina que cuando es más delgada ocurran una mayor frecuencia de fracturas y viceversa (Figura 11B). Igualmente, la granulometría puede influir en la distribución de las fracturas concentrándolas donde es menor (Figura 11C). Estos condicionantes pueden generar una distribución de las fracturas de un modo muy particular (Figura 11D), donde la frecuencia (expresada en cantidad por unidad de longitud) versus la potencia de las



**Figura 10. A:** Relaciones espaciales entre el campo de esfuerzos actuante y las superficies estilolíticas y las venas donde el material disuelto vuelve a ser precipitado. **B:** Esquema de la influencia de superficies estilolíticas en la determinación de la permeabilidad vertical ( $K_v$ ) y horizontal ( $K_h$ ) donde la acumulación de partículas insolubles dificultará la transmisibilidad a través de ellas.

capas exhiben una relación asintótica (Figura 11D).

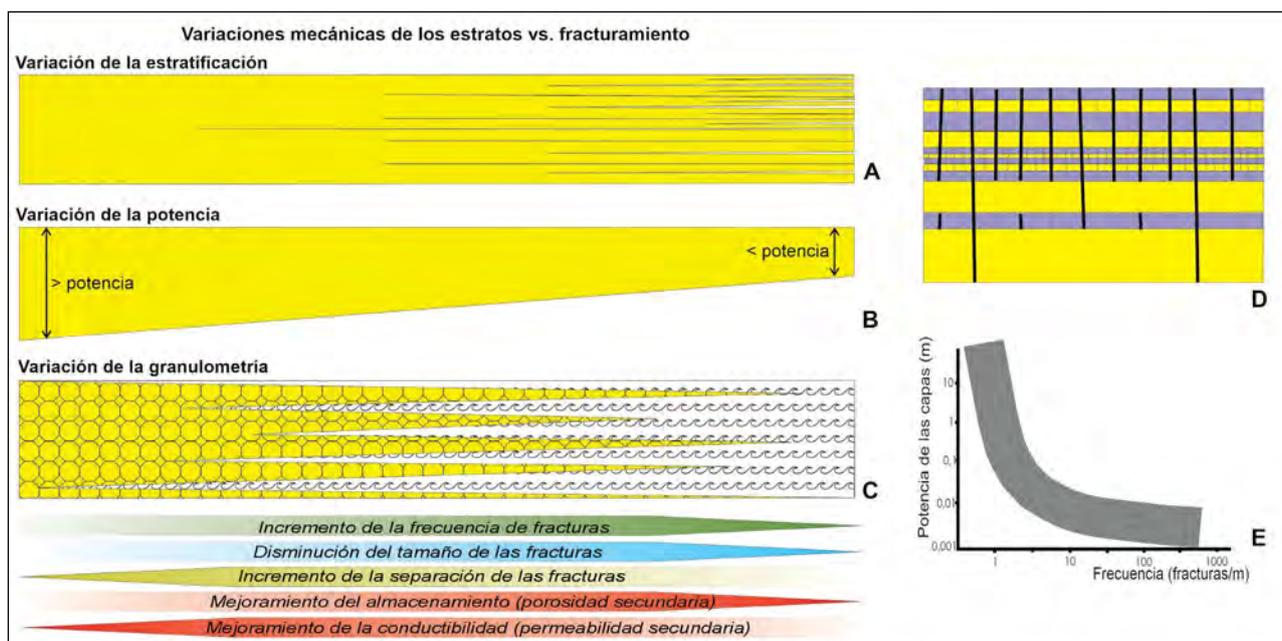
La relación entre la distribución de la fracturación y las variaciones de las características (estratificación, potencia y granulometría) de las capas involucradas puede influir diferencialmente en el desarrollo de mejores condiciones de almacenamiento por el aumento de la frecuencia de fracturas, aunque más discretas. También, influye en la permeabilidad por la generación de fracturas más espaciadas, pero con mayor desarrollo que mejora la conductividad.

En función de la capacidad de circulación de fluidos y presencia de rellenos se las clasifican en fracturas abiertas

y cerradas. La precipitación de minerales como carbonatos, silicatos, etc. tienen la característica de sellar, o en los casos que no sea total disminuir la efectividad de las fracturas para facilitar la transmisibilidad de fluidos. La estratificación y/o laminación contribuye con generación de fracturas al generar discontinuidades mecánicamente activas (Rossello y Saavedra 2019).

La clasificación de fracturas teniendo en cuenta su apariencia y morfología (e.g. Nelson 2001; Tiab y Donaldson 2004; Zoback 2006) se categoriza de la siguiente manera:

- Fractura natural indiscutible: Aquella fractura que



**Figura 11. Esquema que relaciona la frecuencia de fracturas en función de distintas variaciones que pueden exhibir las capas involucradas. A: variación de la presencia de discontinuidades por estratificación-laminación. B: variación de potencia. C: variación de la granulometría. D: esquema de la distribución de las fracturas en una secuencia. E: relación entre frecuencia de fracturas y potencia de las capas involucradas.**

está total o parcialmente llena de material filoniano y también aquella que está abierta y que yace en una tendencia paralela a fracturas total o parcialmente rellenas.

- Fractura natural altamente probable: Fractura con superficies de deslizamiento y lineaciones - bandedamiento paralelas a la misma. o fractura natural probable.

- Fractura con superficie limpia y reciente acompañada de pequeñas fracturas paralelas a una fractura indiscutible.

- Fractura inducida: Son fracturas artificiales generadas por las maniobras de perforación. Generalmente, se reconocen por ser una fractura limpia y reciente, paralela o normal al eje del núcleo, resultado de una flexión o torsión en operaciones de adquisición de los núcleos. Cuando están registradas en los núcleos y perfiles de pozo suelen ser el resultado por fenómenos relacionados con la adquisición y manipuleo de los núcleos.

## DISCUSIÓN

La mayoría de los yacimientos carbonatados y/o silicatados se caracterizan comúnmente por sistemas de porosidad múltiple que imparten heterogeneidad petrofísica al conjunto del intervalo del depósito. Por lo tanto, los tipos específicos y porcentajes relativos de poros presentes, y su distribución dentro del reservorio, ejercen un fuerte control sobre las características de producción y estimulación de los yacimientos.

El impacto de la heterogeneidad en las mediciones de testigos y registros influye en determinar la fiabilidad de las propiedades de pequeña escala medidas por un registro o

núcleo a la propiedad del yacimiento a gran escala. La mayoría de los yacimientos de arenisca son típicamente sistemas de porosidad única (es decir, poros entre partículas) de relativamente uniforme (homogéneo) naturaleza. Sin embargo, la mayoría de los yacimientos de carbonato se caracterizan comúnmente por sistemas de porosidad múltiple que imparten heterogeneidad petrofísica al conjunto del intervalo del reservorio. Por lo tanto, los tipos específicos y relativos de los porcentajes de poros presentes, y su distribución dentro de las rocas, ejercen un fuerte control sobre la producción y estimulación características de los yacimientos carbonatados (Mazzullo y Chilingarian 1992).

El gran problema es reconciliar la variabilidad observada en mediciones de alta resolución a partir de pequeños volúmenes litológicos (*plugs-tapones*), con los grandes volúmenes de los potenciales reservorios con mediciones de baja resolución (e.g., registros de perforaciones, imágenes, etc.). En el caso de los reservorios carbonatados, la porosidad y la permeabilidad obtenida de pequeños recortes, tapones y muestras de núcleo completas comparada con datos del registro del pozo arrojan resultados muy diferentes (Serag el Din et al. 2010). De este modo, indican que la porosidad de muestras de núcleos completos coincidió mucho mejor con la porosidad logarítmica que con la porosidad determinada por núcleos-tapón. En muestras de baja permeabilidad (<10 mD), los núcleos completos tienden a tener valores de permeabilidad más altos que las mediciones de tapón. En cambio, en muestras de alta permeabilidad, los núcleos completos mostraron valores de permeabilidad más bajos que los núcleos-tapones, fenómeno podría estar relacionado con el grado de heterogeneidad y la naturaleza de la roca. Por otro lado, determinan que, en las muestras de baja permeabili-

dad, los volúmenes de roca más grandes pueden mejorar las vías de conexión 3D que pueden promover las vías de flujo y producir mediciones de permeabilidad más altas y en muestras de alta permeabilidad la heterogeneidad sería mayor.

La mejor integración entre el núcleo y el registro de datos y el uso de los parámetros eléctricos correctos en la interpretación petrofísica tiende a minimizar la incertidumbre en cálculos de petróleo original *in-situ* (STOIP POES).

### Interpretación de discontinuidades

La sumatoria de los procesos y manipulaciones sufridos por los núcleos desde su adquisición hasta la medición de sus propiedades en el laboratorio produce un aspecto craquelado puesto de manifiesto por microlitones centimétricos tabulares y hojosos con muchas aristas de intersección agudas que no necesariamente son representativos de las condiciones originales *in situ*. Por otro lado, en los ensayos de laboratorio suelen realizarse en condiciones ambientales de presión y temperatura que no son equivalentes a las presentes en los reservorios, afectados por mayores temperaturas y presiones debidas al soterramiento. Estas diferencias ocasionan situaciones de descompresión que altera la representatividad de los resultados para ser considerados en las rocas *in situ*.

La clásica visualización de las fracturas a través de la interpretación de imágenes de pozos puede generar interpretaciones erróneas relacionadas con sus magnitudes y/o disposiciones espaciales (Figura 12).

De acuerdo con la aplicación de un campo de esfuerzos que supere la resistencia de un macizo rocoso, la interpretación espacial de las fracturas suele menospreciar la influencia de las diferentes respuestas reológicas que tienen las litologías participantes (Rossello y Saavedra 2019). Así, en una secuencia multicomposicional se pueden desarrollar tramos fracturas que afectan con diferentes ángulos a niveles litológicos que exhiben respuestas a la rotura propias. Sin embargo, por razones de simplificación muchas veces se considera un desarrollo lineal uniforme que no tiene en cuenta estas variaciones (Figura 13).

Frecuentemente, el aspecto de fracturación que presentan los núcleos es el producto de la descompactación por descompresión posterior a su adquisición a partir de la liberación de la sobrecarga que favorece una expansión y despegue a partir de los planos de deformación adquiridos por los procesos tectónicos previos (Figura 13). Por otro lado, tampoco suelen asociarse en los análisis estadísticos la influencia de las fracturas relacionadas con las superficies de

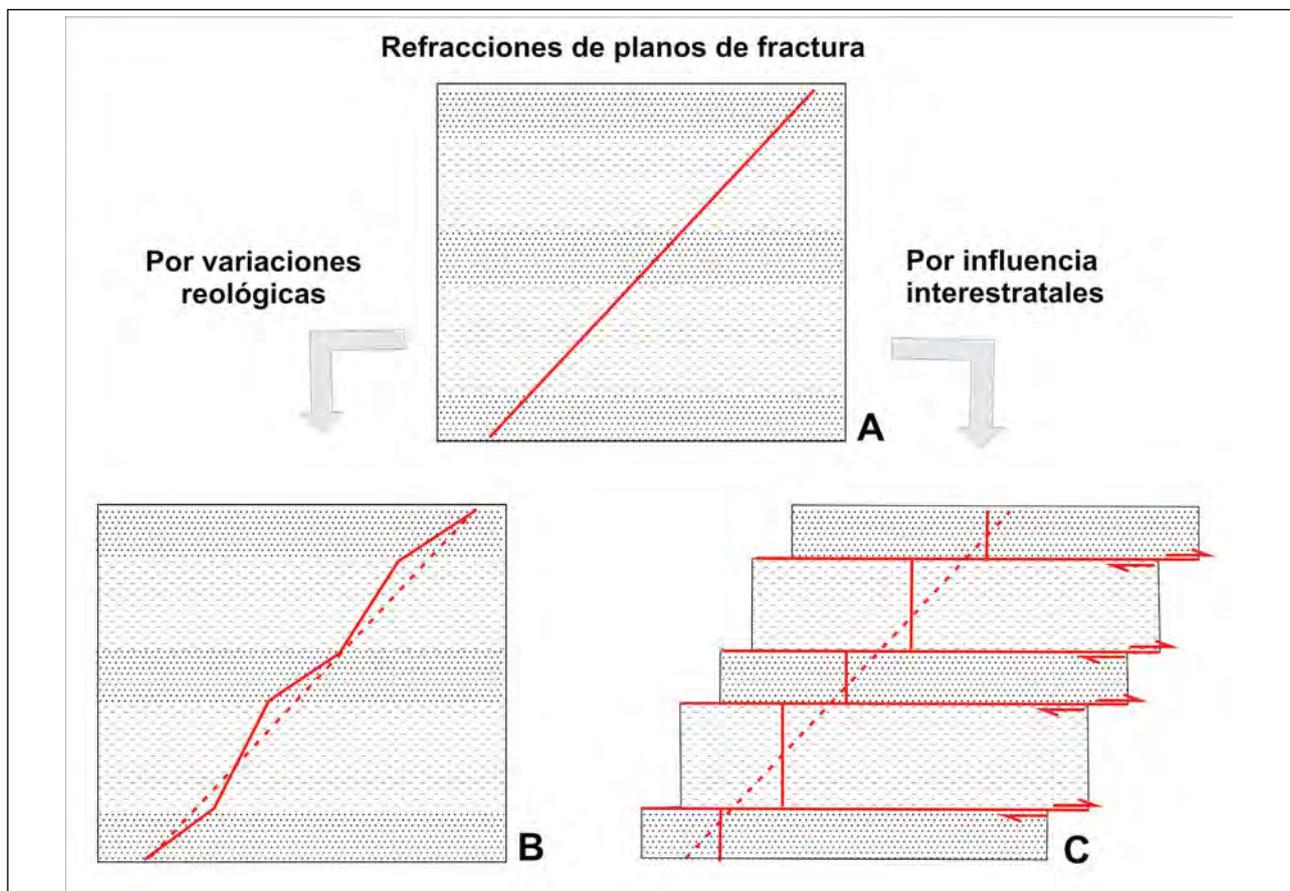


Figura 12. Esquemas de interpretaciones de rasgos discontinuos en imágenes. A: interpretación de fracturas restringidas únicamente a horizontes con respuesta frágil. B: interpretación exagerada de una sinusoide que pasa a través de horizontes que no expresan fracturas. C: interpretación conservadora limitada únicamente a las fracturas correspondientes a los horizontes con respuesta frágil.

estratificación-laminación con las fracturas ortogonales. De este modo, no se tiene en cuenta la importante influencia de la estratificación en el análisis 3D de las fracturas.

En los reservorios que además de sus características sedimentológicas primarias son considerados naturalmente fracturados se deben establecer estructuras detalladas de los yacimientos, utilizándose modelos 3D precisos del subsuelo y, mediante técnicas de lapso de tiempo realizar la evaluación técnico-económica 4D la cual depende de la calidad y disposición de las discontinuidades incluyendo detalles de la estratificación.

### Validez de los resultados

Muchas metodologías habitualmente aplicadas en el estudio del fracturamiento a partir de núcleos y/o imágenes reconocen la presencia de superficies de estratificación (Pijush et al. 2007). Sin embargo, estas últimas al ser evaluadas separadamente no inciden estadísticamente en las consideraciones petrofísicas que contribuyen con la porosidad y permeabilidad. Los resultados obtenidos en las condiciones termobarométricas del laboratorio son difícilmente extrapolables al resto del núcleo, impactando negativamente en la definición de la porosidad y permeabilidad de la formación considerada reservorio.

Los valores de porosidad y permeabilidad obtenidos en el laboratorio de diferentes reservorios areniscosos indican valores sin incorporar la contribución que realizan las fracturas (Figura 14). Para lo cual, hay que considerar factores de corrección que en algunos casos pueden variar entre un 5

al 10% de la porosidad y hasta un 50% en la permeabilidad dependiente de las litologías, historias tectónicas sufridas y profundidades de los niveles reservorios. En algunos casos, las fracturas muestran patrones regulares de distribución espacial que seguramente pueden incrementar los valores obtenidos en el laboratorio (Figura 14A y B). Cuando se analiza la ocurrencia de la estratificación muy marcada y con participación de niveles pelíticos intercalados que además controlan el fracturamiento, los valores de permeabilidad no serán idénticos en el sentido perpendicular o paralelo a ella (Figura 14C).

La toma de los núcleos suele ser muy dificultosa en litologías deleznable, generalmente muy porosas (Figura 12D), o cuando los fragmentos han sufrido rotaciones debido a las operaciones de adquisición produciendo recuperaciones de muy baja calidad (Figura 14E). Debido a que las discontinuidades registradas en un núcleo resultan de la respuesta frágil de las litologías correspondientes, la correlación en conjunto de estos rasgos sin tener en cuenta la presencia de otras litologías interdigitadas que no tienen respuestas equivalentes puede generar interpretaciones erróneas. En todos estos ejemplos, la productividad de fluidos de los pozos exhibió resultados muy superiores a los proporcionados por los ensayos del laboratorio, ya que no fueron considerados los aportes que producen las fracturas.

## CONCLUSIONES

El tamaño de los núcleos influye en la determinación

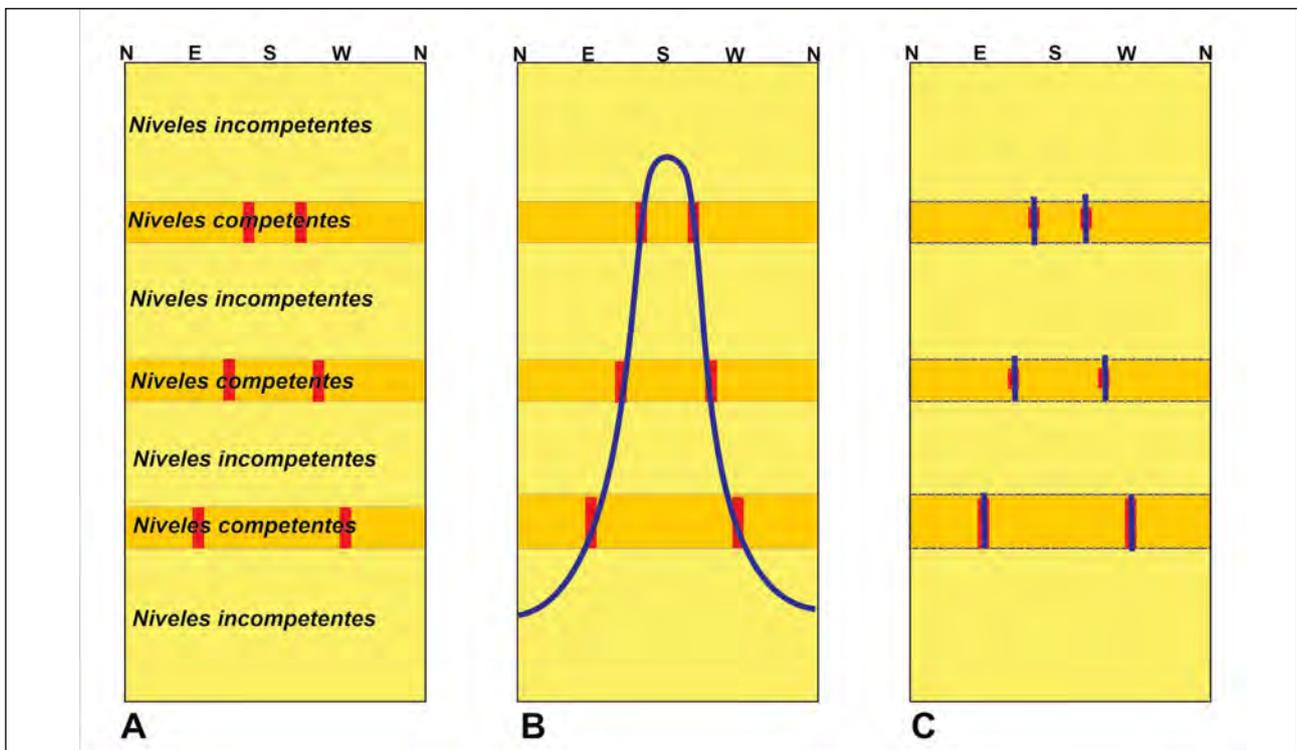
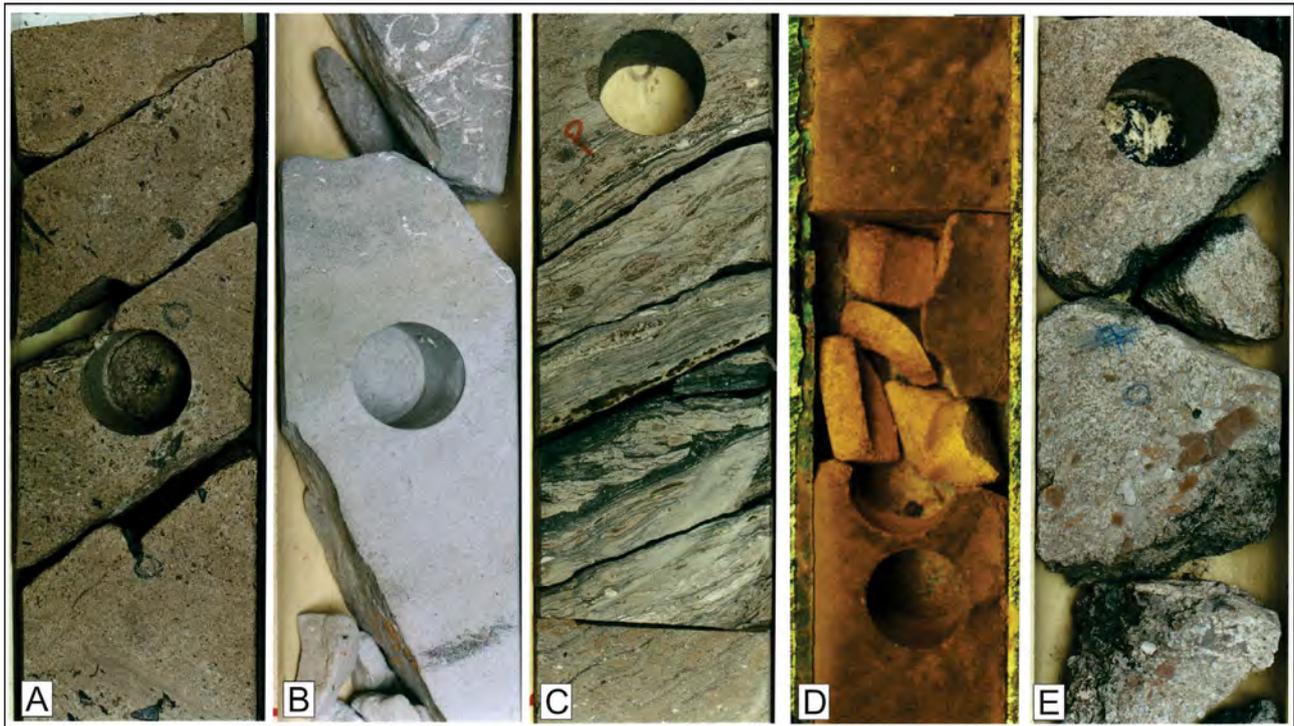


Figura 13. Esquemas de interpretaciones de fracturas en medios mecánicamente estratificados. A: fractura que afecta homogéneamente litologías diferentes. B: fractura que se refracta de acuerdo con las diferentes respuestas a la rotura de litologías diferentes. C: fracturas correspondientes a la reactivación de superficies interestratales y ortogonales.



**Figura 14. Ejemplos de determinaciones de muestros de porosidad ( $\Phi$ ) y permeabilidad en distintos tipos de reservorios areniscos en núcleos fracturados. A:  $\Phi$  11,2% y 30 mD. B:  $\Phi$  16,0% y 24 mD. C:  $\Phi$  14,7% y 1,2 mD. D:  $\Phi$  18,1 % y 1528/661 mD. E: Fragmentos con evidencias de rotaciones y gran pérdida de material.**

volumétrica de la porosidad y permeabilidad de los potenciales reservorios, ya que pueden estar por debajo de la variabilidad litológica que tienen. Por ello, el muestreo mediante la adquisición de taponos-plugs determina siempre valores de porosidad y permeabilidad inferiores a la real debido que no se pondera el aporte de las fracturas naturales en los análisis convencionales. Según casos puntuales de campos en cuencas del antepaís Andino, algunos niveles de reservorios de campos en producción pueden exhibir incrementos en la porosidad de hasta un 5 al 10% de la porosidad y hasta un 50% en la permeabilidad dependiente de las litologías, historias tectónicas sufridas y profundidades de los niveles reservorios

La dificultad mecánica para obtener núcleos (*plugs-taponos*) con características de continuidad estructural y normalizados para ser sometidos a los ensayos de porosidad y permeabilidad limita el muestreo a pequeños sectores macizos de los núcleos.

La determinación de los parámetros de porosidad y permeabilidad son dependientes de la posición espacial, donde a mayor profundidad disminuirán, al igual que las aperturas de las fracturas, debido al incremento de la presión litostática por soterramiento. Como consecuencia del avance de la producción de sus fluidos, la presión de poro progresivamente disminuirá la apertura de la fractura natural.

La estratificación contribuye con el mejoramiento de las características petrofísicas de los reservorios al incorporar una importante participación de discontinuidades que com-

plementa la conectividad de fluidos que generan las fracturas. Se deben tener en cuenta las condiciones termobarométricas imperantes en el reservorio para que en el laboratorio sean adecuadamente simuladas. De este modo se podrán obtener determinaciones de porosidad y permeabilidad semejantes a las condiciones de trabajo imperantes in situ.

Los resultados de porosidad y permeabilidad impactan fuertemente en los análisis de riesgo, por ello su menospreciada ponderación puede calificar negativamente un proyecto exploratorio por su alta injerencia. Por tal razón, se sugiere considerar críticamente los datos provenientes del laboratorio asumiendo y/o ponderando sus potenciales errores.

## AGRADECIMIENTOS

Se desea agradecer a los múltiples colegas que a lo largo de muchos años de trabajo conjunto en la evaluación de las características petrofísicas de núcleos obtenidos en proyectos exploratorios de Latinoamérica nos han contribuido con sus fructíferas discusiones. Las revisiones editoriales han permitido mejorar la claridad del texto.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Eduardo Antonio Rossello y Marcelo Laprea-Bigott. El primer borrador del ma-

nuscrito fue escrito por Eduardo Antonio Rossello y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersen, M.A., Duncan, B. y McLin, R. (2013). Los núcleos en la evaluación de formaciones. *Oilfield Review*, 25 (2), 16-27.
- Anderson, G. (1975). *Coring and core analysis*. Petroleum Publ. Co., 200 pp. Tulsa.
- Aguilera, R. (1995). *Naturally fractured reservoir*. PennWell Publishing Co. (2°Ed.), Tulsa, Oklahoma. ISBN 0-87814-449-8
- Ahmed, T. (2006). *Reservoir engineering handbook*. Gulf Professional Publishing (3° Ed.), 1376 pp. ISBN: 9780080480688
- Amaefule, J., Kersey, D., Marschall, D., Powell, J., Valencia L. y Keelan, D. (1988). Reservoir description: A practical synergistic engineering and geological approach based on analysis of core data. *Society of Petroleum Engineers* 18167.
- Bjorlykke, K. (2014). Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 301, 1-14.
- Bratton, T., Dao Viet Canh, Nguyen Van Que, Nguyen V. Duc, Gillespie, P., Hunt, D., Bingjian Li, Marcinew, R., Satyaki Ray, Montaron, B., Nelson, R., Schoderbek, D. y Sonneland, L. (2006). La naturaleza de los yacimientos naturalmente fracturados. *Oilfield Review*, 4-25.
- Cone, M.P. y Kersey, D.G. (1993). Porosity. In: Morton-Thompson, D., Woods, A.M. (eds.), Development Geology Reference Manual, Part 5 Laboratory Methods. *American Association of Petroleum Geologists, Methods in Exploration Series*, 10, 204-209.
- Craft, B.C., Hawkins, M.F. y Terry, R.E. (1991). *Applied Reservoir Engineering*. Prentice Hall, 222 pp. New Jersey.
- Ehlig-Economides, C.A., Taha, M., Marin, H.D., Novoa, E. y Sánchez, O. (2000). Drilling and completion strategies in naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers, International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico. OnePetro*.
- Ekstrom, M.P., Dahan, C.A., Chen, M.Y., Lloyd, P.M. y Rossi, D.J. (1987). Formation imaging with microelectrical scanning arrays. *Log Analyst* 28, 294-306.
- Fjær, E., Holt, R., Horsrud, P. y Raaen, A. (2008). *Petroleum related rock mechanics*. 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier. ISBN: 9780080557090
- Friedman, M. (1967). Description of rocks and rock masses with a view to their physical and mechanical behavior. *1<sup>st</sup> Int. Congress Rock Mechanics, Proceedings* 3, 181-197.
- Ganat, T.A. (2020). *Fundamentals of reservoir rock properties*. Springer Nature. DOI.org/10.1007/978-3-030-28140-3
- Golf-Racht, T.D. van (1982). *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Elsevier, 657 pp. ISBN: 9780080868660
- Heap, M., Reuschlé, T., Baud, P., Renard, F. y Iezzi, G. (2018). The permeability of stylolite-bearing limestone. *Journal of Structural Geology*, 116. DOI: 10.1016/j.jsg.2018.08.007
- Klinkenberg, L.J. (1941). The permeability of porous media to liquids and gases. *Drilling and Production Practice*, 200–213.
- Kubik, W. y Lowry, P. (1993). Fracture identification and characterization using Cores, FMS, CAST, and Borehole Camera: Devonian Shale, Pike County, Kentucky. *Society of Petroleum Engineers* 25897.
- Laprea-Bigott, M. (2023) Notas de cursos de Ingeniería de Yacimientos, Diseño y Análisis de Pruebas de Presión – Texas A&M University, Petroleum Engineering Department,).
- Laongsakul, P. y Dürrast, H. (2011). Characterization of reservoir fractures using conventional geophysical logging. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 33 (2), 237-246.
- Parsons, R.W. (2007). Permeability of idealized fractured rock. *Society of Petroleum Engineers*, 6, 126-136.
- Pijush, P., Zoback, M. y Hennings, P. (2007). Fluid flow in a fractured reservoir using a geomechanically - Constrained fault zone damage model for reservoir simulation. *Society of Petroleum Engineers, Annual Technical Conference and Exhibition*. DOI: 10.2523/110542-MS

- Poston, S. y Laprea-Bigott, M. (2023). Practical Aspects of Waterflooding. *Society of Petroleum Engineers, SPE Books* (www.onepetro.org),
- Mazzullo, S.J. y Chilingarian, G.V. (1992). Diagenesis and origin of porosity. In: Chilingarian, G.V., Mazzullo, S.J. y Rieke, H.H. (eds.), Carbonate reservoir characterization: A geologic-engineering analysis, Part I. *Elsevier Publ. Co., Developments in Petroleum Science*, 30, 199-270. Amsterdam.
- Miquel González, L, Ortiz Rabell, G. y Castro Castiñeira, O. (2017). Aplicación de la técnica de tomografía axial computarizada para mejorar la caracterización de las rocas sello y reservorio de los yacimientos petroleros cubanos. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (41), 72-79.
- Muskat, M. (1937). The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-0934634168
- Naides, C. (2020). Como construir un modelo petrofísico, del poro al perfil. *Society of Petroleum Engineers*, 49pp.
- Nelson, R.A. (2001). Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. *Gulf Professional Publishing*, 8-43.
- Rossello, E.A. (2017). Influencia del soterramiento en la calidad de los reservorios de hidrocarburos: fundamentos, metodologías prácticas de reconocimiento e interpretación. *Asociación Geológica Argentina, Revista*, 75 (2), 722-735.
- Rossello, E.A. (2018). Interpretaciones estructurales dinámicas a partir del análisis de ovalización (break-outs) de pozos: aplicaciones a perforaciones en la Formación Vaca Muerta (Cuenca Neuquina, Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 75 (2), 252-264.
- Rossello, E.A. y Saavedra, J.L. (2019). Contribution of bedding to the petrophysical characterization of naturally fractured reservoirs: Example of the Matachines fields, Upper Magdalena Valley. *Boletín de Geología*, 46, 23-49.
- Rushing, J.A., Newsham, K.E., Lasswell, P.M., Cox, J.C. y Blasingame, T.A. (2004). Klinkenberg -corrected permeability measurements in tight gas sands: Steady-state versus unsteady-state techniques. SPE 89867, *Conferencia y Exhibición Técnica Anual*, Houston.
- Saidi, A.M. (1987). *Reservoir engineering of fractured reservoirs*. Total Edicione, 864 pp., Paris.
- Schlumberger (1987). *Principios y aplicaciones de la interpretación de registros*. <https://es.scribd.com/document/95473890/>
- Serag El Din, S., Dernaika, M.R., Al Hosani, I., Hannon, L., Skjæveland, S.M. y Kalam, M.Z. (2010). Whole core versus plugs: Integrating log and core data to decrease uncertainty in petrophysical interpretation and STOIP calculations. *Society of Petroleum Engineers*, 18 pp. SPE 137679
- Serra, O. (2008). *Well Logging Handbook*. Technip Editions, 604 pp., Paris.
- Stearns, D.W. y Friedman, M. (1972). Reservoirs in fractured rock. *American Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 16, 82-106. DOI.org/10.1306/M16371C8
- Tiab, D. y Donaldson, E.C. (2004). *Petrofísica*. Elsevier, 914 pp. Oxford, UK.
- Warren, J.E. y Root, P.J. (1963). The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers, Journal* 3 (03), 245-255. DOI.org/10.2118/426-PA
- Zoback, M.D. (2006). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press. 449 pp. DOI.org/10.1017/CBO9780511586477

# Análisis comparativo de resultados de diferentes métodos de ensayo para evaluar la potencial reactividad de arenas del sur de la provincia de Buenos Aires frente a la reacción álcali-sílice

## Comparative analysis of different test methods to evaluate the potential reactivity of sands from the south of the province of Buenos Aires against the alkali-silica reaction

 Juan José Berezosky<sup>1</sup>   Darío Daniel Falcone<sup>2</sup>   Francisco Locati<sup>3</sup>   Silvana Andrea Marfil<sup>4\*</sup> 

\*Contacto

Recibido: 22 de junio de 2023 ▪ Aceptado: 22 de noviembre de 2023 ▪ Publicado: 4 de diciembre de 2023

### Resumen

Se estudiaron arenas procedentes de cinco canteras ubicadas en el sur de la provincia de Buenos Aires y una del norte de la provincia de Río Negro, calificadas como potencialmente reactivas frente a la reacción álcali-sílice (RAS) en trabajos previos según el ensayo acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674). Se realizó un estudio petrográfico de detalle (IRAM 1649) cuantificando los componentes potencialmente reactivos, así como ensayos físicos complementarios según el ensayo del prisma de hormigón (IRAM 1700) convencional (a 38 °C) y acelerado (a 60 °C), y se compararon los resultados con los obtenidos previamente. Se concluyó que todas las arenas analizadas contienen vidrio volcánico, como trizas de vidrio fresco y en la mesostasis de algunas rocas volcánicas como especies deletéreas frente a la RAS, a pesar de tener diferentes proveniencias. Si bien todas las canteras analizadas fueron calificadas como potencialmente reactivas según el ensayo petrográfico y el ensayo acelerado de la barra de mortero, en el prisma de hormigón (tanto acelerado como convencional), presentaron un comportamiento variable. Solo la arena de la cantera 5 (de confirmada reactividad en estructuras en servicio) arrojó resultados por encima de los límites establecidos por todos los métodos de ensayos normalizados utilizados, por lo que se califica como potencialmente reactiva.

**Palabras clave:** agregados, reacción álcali-sílice, ensayos normalizados

### Abstract

Sands from five quarries located in the south of the Buenos Aires province and one from the north of the province of Río Negro, qualified as potentially reactive against the alkali-silica reaction (ASR) in previous studies according to the accelerated mortar bar test (IRAM 1674), were studied. A detailed petrographic study was performed (IRAM 1649), quantifying the potentially reactive components, as well as

1 Dirección Nacional de Vialidad, Distrito 19, Bahía Blanca, Argentina.

2 Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica. Comité de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional de La Plata

3 Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Córdoba. Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de Córdoba.

4 Departamento de Geología. Universidad Nacional del Sur. Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente. Comité de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires.

complementary physical tests according to the conventional (at 38 °C) and accelerated (at 60 °C) concrete prism test, and the results were compared with those previously obtained. It was concluded that all sands contain volcanic glass, in the form of fresh volcanic shards and in the mesostasis of some volcanic rocks, as deleterious species against the ASR, despite they have different provenances. Although all analyzed quarries were qualified as potentially reactive, in the concrete prism (both accelerated and conventional), they have presented variable behavior. Only the sand from quarry 5 (of confirmed reactivity in structures in service) shows results above the limits established by all the standardized tests used to evaluate the potential reactivity against the ASR, therefore, it is qualified as potentially reactive.

**Keywords:** aggregates, alkali-silica reaction, standardized tests.

## INTRODUCCIÓN

El deterioro prematuro de estructuras de hormigón debido al desarrollo de la reacción álcali-sílice (RAS) es un problema que tomó relevancia a nivel internacional a principio de 1940. Esta reacción se produce entre la solución de poro presente en el hormigón y las formas de sílice metaestable de ciertos agregados. Entre los principales componentes potencialmente reactivos se pueden mencionar las variedades de sílice criptocristalina (tridimita, cristobalita) y amorfa (ópalo), calcedonia y vidrio volcánico, considerados de reacción rápida, y cuarzo microcristalino, fuertemente tensionado y microfracturado, de reacción lenta. Los álcalis provienen principalmente del cemento, aunque también pueden ser aportados por los agregados y por fuentes externas. Para que la reacción se desarrolle es necesario un elevado contenido de álcalis, agregados potencialmente reactivos y una humedad relativa elevada (superior al 80 %) en forma simultánea. Esta reacción produce un gel que se expande por la absorción de agua y provoca fisuras en el hormigón (Sims y Poole, 2017).

En el sur de la provincia de Buenos Aires existen varios yacimientos sedimentarios (de origen eólico, fluvial y marino) que se utilizan como agregados finos para hormigón, algunos de ellos de conocida reactividad frente a la RAS. Los primeros trabajos en la zona vinculados con esta temática fueron realizados por Batic et al. (1974) utilizando el método convencional de la barra de mortero (IRAM 1637, 1966) (actualmente en desuso). Posteriormente, Maiza et al. (1988) y Marfil (1989) estudiaron varias canteras próximas a la ciudad de Bahía Blanca y calificaron a los materiales como potencialmente reactivos utilizando los métodos de ensayo químico (IRAM 1650, 1968), (actualmente en desuso), petrográfico (IRAM 1649, 2008) y el método convencional de la barra de mortero. Concluyeron que la reactividad se debía a la presencia de rocas volcánicas, tobas con pastas vítreas y trizas de vidrio volcánico en algunas de ellas. Éstas y otras canteras, provenientes de la zona costera (Claromecú) y Río Colorado, fueron estudiadas por Berezosky et al. (2016) utilizando el método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997). Todas las muestras mostraron expansiones entre 0,155 % y 0,751 % a los 16 días (14 días en solución 1 N de NaOH), superiores al límite máximo (0,1 %) estipulado en la norma IRAM 1512 (2013), concluyendo, al igual que en los trabajos previos, que la expansión está en directa relación con el contenido de rocas volcánicas con pastas vítreas y trizas de vidrio volcánico en las arenas.

En resumen, se puede concluir que el material utilizado como agregado fino en la zona de Bahía Blanca está constituido por más del 40 % de rocas de origen volcánico, la mayoría con pastas vítreas (frescas y parcialmente alteradas a minerales arcillosos). El contenido de trizas de vidrio volcánico fresco oscila entre 3 % y 7 %. Sin embargo, las diferentes canteras del sur de la provincia poseen mezclas de éstos y otros materiales geológicos en proporciones muy variables, por lo que una cuidadosa caracterización petrográfica y la evaluación de su reactividad alcalina potencial a través de ensayos normalizados es determinante a la hora de optar por un proveedor de agregado fino para la ejecución de estructuras de hormigón o para definir medidas de prevención frente a la reacción (Berezosky et al., 2017).

Por otra parte, en la zona existen antecedentes de estructuras de hormigón afectadas por el desarrollo de la RAS debido al uso de estas arenas (Señas et al., 2010, Berezosky et al., 2015, 2018, entre otros).

Falcone (2013) realizó un exhaustivo trabajo de recopilación bibliográfica considerando la información disponible sobre los distintos métodos de ensayos para evaluar la reactividad potencial de los agregados frente a la RAS considerando las normativas, los antecedentes de estudios realizados en el laboratorio LEMIT desde 1965 y los resultados obtenidos en sus experiencias. La vinculación de los resultados de laboratorio con el comportamiento en obra comúnmente se desvirtúa en función del cambio en los mecanismos de la reacción debido al aumento del grado de agresividad comparado con la exposición de la estructura de hormigón. Las variables más usadas para acelerar los tiempos de ensayos son modificar la temperatura y/o el contenido de álcalis de las mezclas de mortero u hormigón. En este sentido se encuentran normalizados, el método acelerado de la barra de mortero y el método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013). Su empleo tampoco se puede generalizar para cualquier tipo de mineralogía. Cuando el agregado es de reacción rápida, la mayoría de los métodos de ensayo lo pondrá de manifiesto a corto plazo. El mayor inconveniente radica cuando se evalúan agregados de reacción lenta, que contienen cuarzo tensionado y/o microcristalino, para los cuales algunos métodos no permiten calificar a ciertos agregados como potencialmente reactivos debido a las condiciones del ensayo o a la edad en que se evalúa la expansión. En el ensayo del prisma de hormigón convencional el tiempo de ensayo es muy prolongado (un año), por lo tanto, es necesario prever los ensayos de agregados con anticipación a ser

usados en obra. Los resultados de este ensayo son confiables y determinantes frente a los otros métodos, además de tener buena reproducibilidad. El ensayo es muy versátil para estudiar soluciones preventivas prestacionales, como el tipo y proporción de adición mineral activa (AMA), o la incorporación de sales de litio.

Por lo expuesto y considerando que todas las arenas del sur de la provincia de Buenos Aires fueron calificadas como potencialmente reactivas según el ensayo acelerado de la barra de mortero, aunque son pocas las que han evidenciado RAS en estructuras en servicio, en el presente trabajo se analiza la reactividad de las arenas del sector a través de un estudio petrográfico de detalle cuantificando los componentes reactivos, y con el método del prisma de hormigón convencional (a 38 °C) y acelerado (a 60 °C), y se comparan los resultados con los obtenidos en trabajos previos utilizando el ensayo acelerado de la barra de mortero.

## MATERIALES

Se seleccionaron cuatro canteras del sur de la provincia de Buenos Aires y una del norte de la provincia de Río Negro (Figura 1), calificadas como potencialmente reactivas en trabajos previos según el método acelerado de la barra de mortero. Para la realización del ensayo se confeccionaron barras de 25 mm x 25 mm x 300 mm, con una parte de cemento y 2,25 partes de agregado con una relación agua/cemento de 0,47. Se curaron a temperatura ambiente durante un día. Una vez que fraguaron se desmoldaron y se tomó una primera lectura de referencia. Luego, se sumergieron en agua a 80 °C ± 2 °C en un recipiente de almacenamiento durante 24 horas y se registró la lectura cero. Finalmente, se

sumergieron en una solución 1N de NaOH (Figura 2a) y se colocaron en una estufa a 80 °C ± 2 °C, tomando lecturas periódicas (Figura 2b) hasta 16 días (14 días en solución de NaOH). Según la norma IRAM 1512 (2013), el agregado se considera potencialmente reactivo si la expansión supera el límite de 0,1 % a los 16 días.

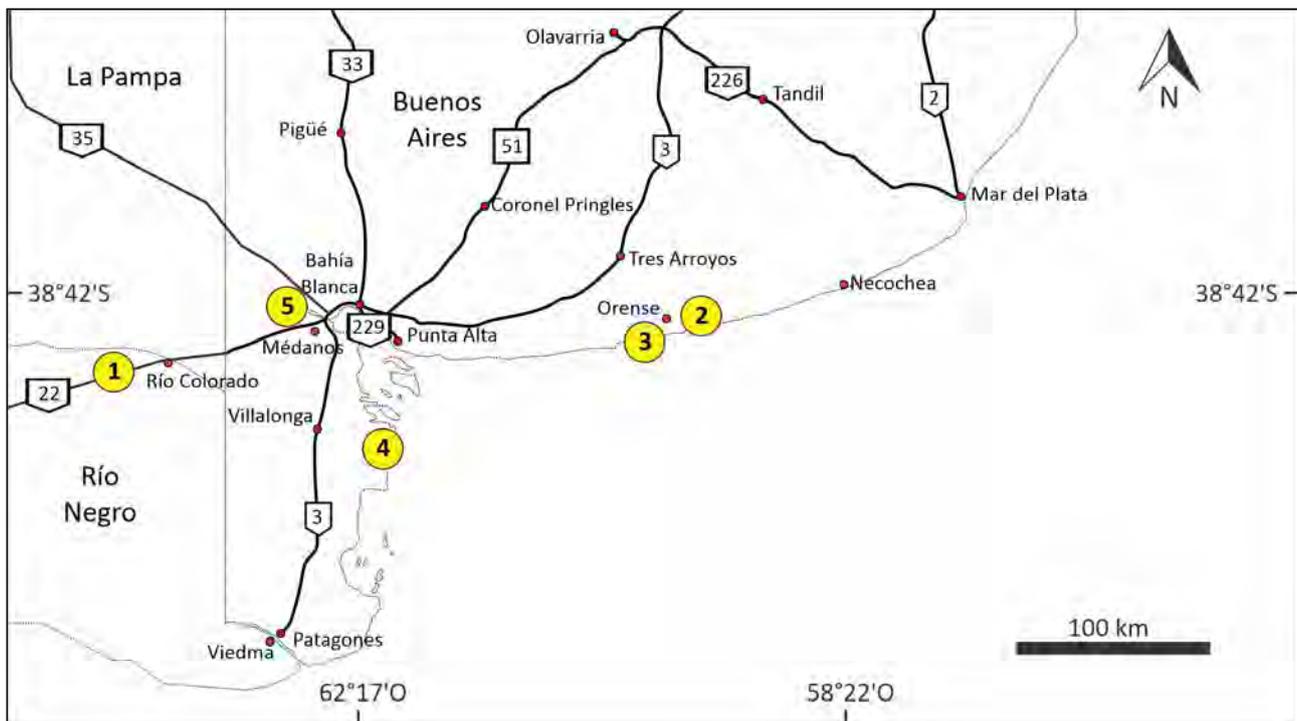
En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos donde se observa que todas superan el límite máximo de expansión (0,1 %) a los 16 días, aunque las muestras de las canteras 4 y 5 son las que presentan los mayores valores (Berezosky et al., 2016).

## MÉTODOS

Se tomaron muestras representativas provenientes de los acopios de cada cantera y se tamizaron utilizando un juego de tamices normalizado de la serie ASTM N° 10, 18, 30, 60 y 100 de abertura cuadrada. Posteriormente se realizó el análisis petrográfico de cada muestra según lo establecido en la norma IRAM 1649 (2008), siguiendo los criterios de la norma IRAM 1512 (2013), mediante un estereomicroscopio

**Tabla 1. Resultados del método acelerado de la barra de mortero (IRAM 1674, 1997) (Berezosky et al., 2016).**

CANTERA	EXPANSIÓN (%) A LA EDAD DE 16 DÍAS
1	0,271
2	0,290
3	0,168
4	0,382
5	0,677



**Figura 1. Ubicación de las canteras estudiadas (1 a 5). Modificado de Berezosky et al. (2016).**



**Figura 2. Preparación y medición de barras de mortero (a, b) y prismas de hormigón (c, d). a. Barras de mortero en solución 1N de NaOH. b. Medición de la expansión. c. Almacenamiento de prismas de hormigón en cámara húmeda a 38 °C. d. Medición de la expansión.**

trinocular Leica S9i. El análisis petrográfico es el primer ensayo que se aplica para estudiar la potencial reactividad de un agregado para hormigón. Se realiza sobre el retenido en cada fracción, comenzando por las divisiones mayores y analizando 500 partículas en cada retenido. Finalmente se realizaron los cálculos correspondientes teniendo en cuenta los porcentajes retenidos en cada tamiz (cálculos ponderados) y se calculó la composición final de la muestra.

En la Tabla 2 se muestran los contenidos máximos de componentes considerados potencialmente reactivos frente a la RAS según la norma IRAM 1512 (2013). Esta norma también menciona que si la muestra de agregado en estudio contiene más de uno de esos componentes debe considerarse potencialmente reactiva independientemente del porcentaje en el que se presente.

Además, se realizó el ensayo del prisma de hormigón (convencional a 38 °C y acelerado a 60 °C) según lo establecido en la norma IRAM 1700 (2013) para comparar los resultados con los obtenidos en el ensayo acelerado de la barra de mortero. Se confeccionaron prismas de 75 mm x 75 mm x 275 mm con las arenas objeto de estudio. Como agregado grueso se utilizó un basalto (tamaño 6 mm - 20 mm) proveniente de la provincia de Córdoba de conocido comportamiento inocuo (Falcone, 2013), con una relación 40/60. Se utilizaron 420 kg/m<sup>3</sup> de cemento portland con una relación agua/cemento entre 0,42 y 0,45 según los requisitos de trabajabilidad, y la alcalinidad se ajustó hasta 5,25 kg de Na<sub>2</sub>O/m<sup>3</sup> en el hormigón. El conjunto de prismas se colocó en recipientes de almacenamiento a 23 °C durante 24 horas. Cumplido el tiempo se desmoldaron y se tomó la primera lectura de referencia. Luego se envolvieron en una tela de algodón

**Tabla 2. Minerales y rocas potencialmente reactivas (IRAM 1512, 2013).**

Reacción álcali-sílice (RAS)	MINERALES / ROCAS	CONTENIDO MÁXIMO
		Cuarzo fuertemente tensionado, microfracturado
	Cuarzo microcristalino (< 62 µm)	5,0
	Ftanita, chert	
	Calcedonia	3,0
	Tridimita	
	Cristobalita	1,0
	Ópalo	0,5
	Vidrio volcánico contenido en rocas volcánicas	3,0

saturada en agua cubierta con una lámina de polietileno, se colocaron en una bolsa de nylon con 5 ml de agua destilada y se cerraron herméticamente. Posteriormente, se colocaron en cámara húmeda a  $38 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 1 año (Figura 2c), tomando lecturas periódicas a 1, 2, 4, 8, 13, 18, 26, 39 y 52 semanas (Figura 2d). En cada medición, los contenedores se retiraron 24 horas antes para estabilizar la temperatura de lectura a  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . De acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 1531 (2016), si la expansión no supera el límite de 0,04 % al cabo de un año, los agregados son considerados no reactivos y pueden ser usados sin ninguna restricción, a menos que estructuras existentes muestren un comportamiento reactivo de estos agregados. Si presentan expansiones mayores a 0,04 %, será necesario adoptar medidas preventivas para evitar el desarrollo de la RAS.

El procedimiento establecido por la norma IRAM 1700 a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  (2013) es similar al descrito para  $38 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se diferencia en que se eleva la temperatura de  $38 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  y se toman lecturas periódicas a 5, 8, 10, 13, 15 y 20 semanas. Las probetas se mantuvieron por 24 horas a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y una humedad relativa mayor que 90 %. Luego se sumergieron en agua 30 minutos a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y se realizó una lectura inicial, posteriormente se colocaron en un contenedor con 35 mm de agua en el fondo, en una cámara a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  y 100 % de humedad relativa. Se realizaron lecturas periódicas de las longitudes de los prismas de hormigón, previamente enfriados a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y 100 % de humedad. Se utilizaron  $420 \text{ kg/m}^3$  de cemento con un contenido total de álcalis de  $5,25 \text{ kg/m}^3$  en el hormigón.

Luego de cumplido el tiempo de ensayo se realizaron cortes delgados de los prismas para su estudio con microscopio petrográfico a fin de observar la microestructura, desarrollo de microfisuras y productos de reacción. Para ello se utilizó un microscopio Leica DM750P.

## RESULTADOS

### Método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a $60 \text{ }^\circ\text{C}$

En la Tabla 3 se muestra la expansión (%) obtenida a

las diferentes edades de ensayo para cada una de las muestras analizadas. Se puede observar que solo las canteras 4 y 5 presentan valores superiores al máximo establecido en la norma IRAM 1700 (2013) (0,04 % a las 13 semanas). Las muestras de las tres canteras restantes presentan valores de expansión semejantes entre sí (0,03 %). En la Figura 3 se grafican los resultados y se comparan con el límite máximo establecido en la norma.

### Método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a $38 \text{ }^\circ\text{C}$

En la Tabla 4 se muestra la expansión (%) obtenida a diferentes edades de ensayo para cada una de las muestras analizadas. Se observa que solo la cantera 5 presenta valores superiores al máximo establecido en la norma IRAM 1700 (2013) (0,04 % a las 52 semanas). Las muestras de las cuatro canteras restantes presentan valores de expansión entre 0,02 % y 0,03%. En la Figura 4 se grafican los resultados y se comparan con el límite máximo establecido en la norma.

## Análisis petrográfico

En las Tablas 5-9 se muestra la composición de los agregados estudiados según los lineamientos de la norma IRAM 1649 (2008). La composición petrográfico-mineralógica varía de una cantera a otra, aunque en general presentan componentes similares en proporciones variables. La principal

**Tabla 3. Resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .**

CANTERA	EXPANSIÓN (%) A LA EDAD DE (SEMANAS)					
	5	8	10	13	15	20
Cantera 1	0,025	0,031	0,030	<b>0,030</b>	0,031	0,032
Cantera 2	0,019	0,026	0,025	<b>0,034</b>	0,033	0,034
Cantera 3	0,026	0,030	0,029	<b>0,034</b>	0,034	0,033
Cantera 4	0,050	0,066	0,074	<b>0,082</b>	0,081	0,090
Cantera 5	0,322	0,352	0,359	<b>0,391</b>	0,395	0,395

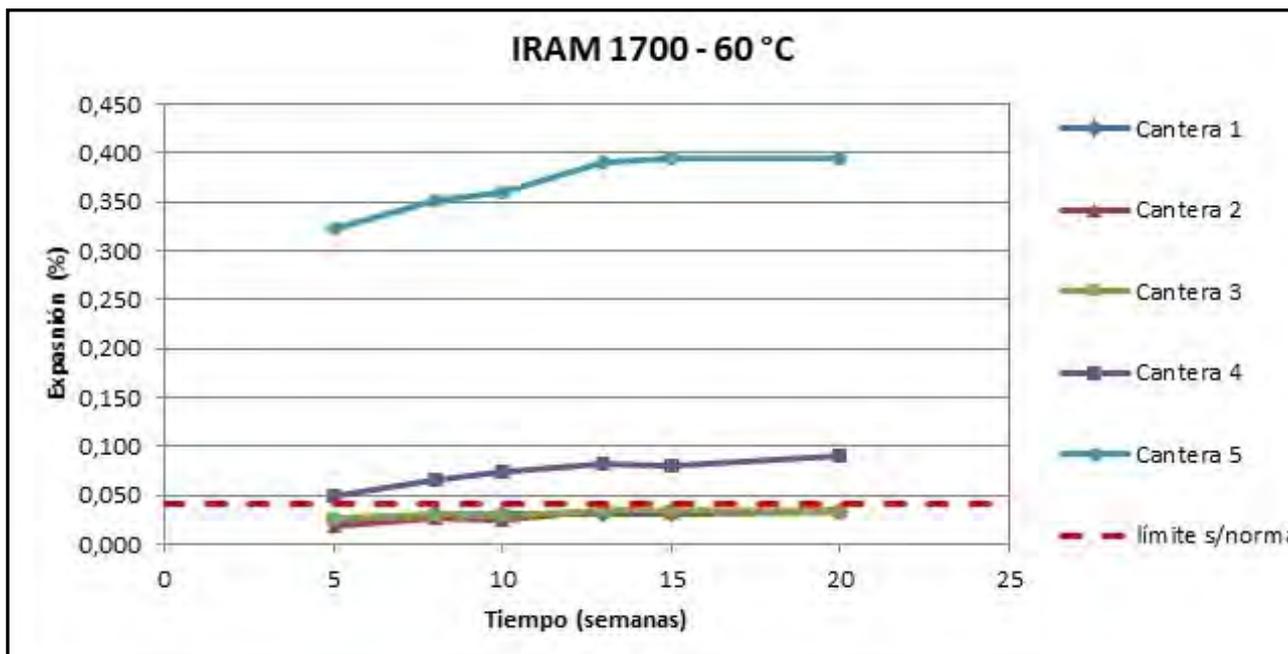


Figura 3. Curvas de expansión según los resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 60 °C.

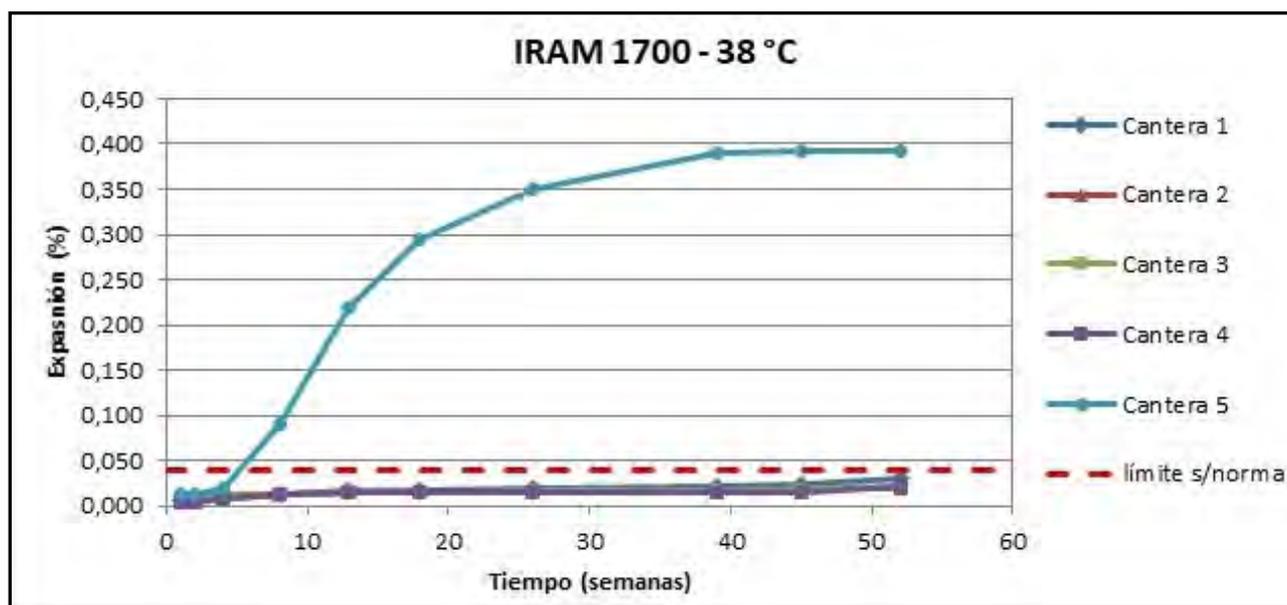


Figura 4. Curvas de expansión según los resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 38 °C.

Tabla 4. Resultados del método del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 38 °C.

CANTERA	EXPANSIÓN (%) A LA EDAD DE (SEMANAS)									
	1	2	4	8	13	18	26	39	45	52
Cantera 1	0,005	0,011	0,008	0,012	0,017	0,017	0,020	0,022	0,024	<b>0,030</b>
Cantera 2	0,005	0,007	0,009	0,013	0,016	0,016	0,018	0,018	0,019	<b>0,020</b>
Cantera 3	0,006	0,009	0,013	0,012	0,015	0,016	0,018	0,018	0,019	<b>0,022</b>
Cantera 4	0,004	0,004	0,009	0,013	0,016	0,014	0,014	0,015	0,016	<b>0,021</b>
Cantera 5	0,012	0,012	0,020	0,091	0,220	0,295	0,351	0,389	0,392	<b>0,392</b>

diferencia es que las arenas de origen marino tienen valvas carbonáticas y mayor contenido de cuarzo, mientras que las restantes contienen mayor cantidad de rocas volcánicas (andesitas, riolitas y tobas). Subordinadamente se identificaron cuarcitas, areniscas y partículas monominerales de feldespatos, anfíboles y piroxenos.

Como componentes potencialmente reactivos se identificó vidrio volcánico fresco como partículas individuales (trizas), y parcialmente alterado en la mesostasis de algunas vulcanitas ácidas y tobas. Además, se identificó calcedonia en una de las canteras y ocasionalmente cuarzo microcristalino en fragmentos de cuarcitas.

## PETROGRAFÍA DE LOS PRISMAS DE HORMIGÓN

### Prisma de hormigón acelerado (IRAM 1700, 2013) a 60 °C

Los prismas realizados con la arena de la cantera 1 muestran escasas evidencias de reacción. Se observaron muy pocas microfisuras en la pasta (de poca apertura y vacías), que en general no afectan los componentes de los agregados. Solo se observó una microfisura que afecta partículas de vulcanitas (Figura 5a). En la composición de la arena predomina cuarzo, areniscas, plagioclasas y piroxenos en forma subordinada. Son escasas las vulcanitas (en especial

**Tabla 5. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 1 (IRAM 1649, 2008).**

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Rocas volcánicas ácidas	0,07	0,26	1,79	3,67	2,87	1,20	<b>9,86</b>
Rocas volcánicas básicas	0,12	0,24	1,79	9,90	6,38	2,63	<b>21,07</b>
Rocas graníticas	0,19	0,21	0,49	6,05	3,59	1,40	<b>11,93</b>
Cuarzo	0,00	0,16	3,09	29,35	8,38	4,34	<b>45,31</b>
Feldespatos	0,02	0,01	0,12	0,00	0,00	0,00	<b>0,15</b>
Cuarcitas	0,05	0,10	0,87	2,20	1,76	0,27	<b>5,24</b>
Areniscas	0,02	0,06	0,29	2,93	0,64	0,10	<b>4,05</b>
Tosca	0,05	0,04	0,17	0,00	0,00	0,00	<b>0,26</b>
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,01	0,14	1,10	0,72	0,17	<b>2,14</b>
TOTAL	0,52	1,09	8,75	55,20	24,34	10,11	<b>100,00</b>

**Tabla 6. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 2 (IRAM 1649, 2008).**

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	0,02	1,90	4,88	3,19	0,09	0,06	<b>10,14</b>
Cuarzo	0,00	0,25	3,31	34,03	27,04	3,70	<b>68,33</b>
Rocas volcánicas básicas	0,00	0,30	0,59	2,90	1,94	0,41	<b>6,13</b>
Rocas volcánicas ácidas	0,00	0,19	0,25	0,43	0,00	0,00	<b>0,87</b>
Areniscas	0,00	0,04	0,08	1,45	3,23	0,26	<b>5,06</b>
Cuarcitas	0,00	0,00	0,45	2,90	2,12	0,00	<b>5,47</b>
Piroxenos y anfíboles	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	1,25	<b>2,18</b>
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,04	0,00	0,43	0,92	0,06	<b>1,45</b>
Rocas graníticas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	<b>0,37</b>
TOTAL	0,02	2,71	9,56	45,32	36,64	5,74	<b>100,00</b>

**Tabla 7. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 3 (IRAM 1649, 2008).**

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	0,05	1,64	3,59	2,12	0,59	0,00	<b>7,99</b>
Cuarzo	0,00	0,31	2,13	39,55	20,79	2,46	<b>65,24</b>
Rocas volcánicas básicas	0,00	0,22	0,66	6,21	4,28	0,59	<b>11,96</b>
Rocas volcánicas ácidas	0,00	0,13	0,35	2,12	1,07	0,08	<b>3,76</b>
Areniscas	0,00	0,02	0,08	1,80	2,14	0,00	<b>4,04</b>
Cuarcitas	0,00	0,02	0,12	0,98	0,24	0,00	<b>1,36</b>
Piroxenos y anfíboles	0,00	0,00	0,00	0,49	1,43	1,37	<b>3,29</b>
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,01	0,06	0,65	0,83	0,06	<b>1,61</b>
Feldespatos	0,00	0,04	0,02	0,33	0,36	0,00	<b>0,75</b>
<b>TOTAL</b>	<b>0,05</b>	<b>2,39</b>	<b>7,01</b>	<b>54,26</b>	<b>31,72</b>	<b>4,57</b>	<b>100,00</b>

**Tabla 8. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 4 (IRAM 1649, 2008).**

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Valvas	1,06	0,83	0,83	0,00	0,00	0,00	<b>2,71</b>
Cuarzo	0,00	0,10	0,58	18,27	6,75	9,89	<b>35,58</b>
Rocas volcánicas básicas	2,67	0,47	0,19	4,26	1,53	0,44	<b>9,55</b>
Rocas volcánicas ácidas	4,83	0,36	0,17	1,37	0,51	0,11	<b>7,34</b>
Areniscas	3,22	1,24	0,99	7,46	5,09	0,00	<b>18,00</b>
Cuarcitas	1,06	0,20	0,15	2,74	0,76	0,00	<b>4,91</b>
Feldespatos	0,10	0,01	0,00	3,04	1,27	0,11	<b>4,54</b>
Rocas graníticas	2,67	0,17	0,34	4,11	2,16	0,22	<b>9,67</b>
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,01	0,07	1,52	1,02	0,11	<b>2,73</b>
Minerales opacos	0,00	0,00	0,00	0,91	0,38	0,66	<b>1,95</b>
Tosca	0,15	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,28</b>
Piroxenos y anfíboles	0,00	0,00	0,00	1,37	1,15	0,22	<b>2,74</b>
<b>TOTAL</b>	<b>15,74</b>	<b>3,51</b>	<b>3,32</b>	<b>45,05</b>	<b>20,62</b>	<b>11,75</b>	<b>100,00</b>

**Tabla 9. Análisis petrográfico de las arenas de la cantera 5 (IRAM 1649, 2008).**

CONSTITUYENTES	% EN PESO PONDERADO DE LOS CONSTITUYENTES EN CADA FRACCIÓN RETENIDA EN LOS TAMICES Nº						Composición de la muestra total %
	10	18	30	60	100	<100	
Rocas volcánicas ácidas	2,90	3,59	3,68	12,83	4,19	1,32	<b>28,50</b>
Rocas volcánicas básicas	0,49	1,21	0,84	4,02	1,12	0,64	<b>8,32</b>
Rocas graníticas	1,80	1,36	0,93	1,78	0,48	0,07	<b>6,43</b>
Cuarzo	0,86	3,18	3,61	12,07	7,05	3,64	<b>30,40</b>
Feldespatos	0,28	0,17	0,33	2,58	0,36	0,42	<b>4,13</b>
Areniscas	2,57	1,53	0,64	1,10	0,45	0,37	<b>6,66</b>
Trizas de vidrio volcánico	0,00	0,20	0,44	3,05	1,15	0,34	<b>5,19</b>
Tosca	0,36	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,44</b>
Terrones blandos	0,32	0,13	0,03	0,00	0,00	0,00	<b>0,48</b>
Anfíboles y piroxenos	0,00	0,50	0,47	3,73	1,21	0,61	<b>6,52</b>
Minerales opacos	0,45	0,38	0,30	0,30	0,00	0,00	<b>1,43</b>
Areniscas calcáreas	0,48	0,24	0,14	0,00	0,00	0,00	<b>0,86</b>
Calcedonia	0,19	0,18	0,23	0,04	0,00	0,00	<b>0,65</b>
<b>TOTAL</b>	<b>10,70</b>	<b>12,75</b>	<b>11,64</b>	<b>41,51</b>	<b>16,00</b>	<b>7,42</b>	<b>100,00</b>

andesitas y basaltos), y en general presentan pastas vítreas. Además, se observaron escasas trizas de vidrio volcánico y una partícula de calcedonia. Algunas areniscas tienen cuarzo microcristalino.

En el prisma confeccionado con la arena de la cantera 2 se observó abundante cantidad de valvas carbonáticas (Figura 5b), cuarzo, feldespatos, escasos minerales opacos, areniscas (la mayoría con cuarzo microcristalino) y vulcanitas (algunas con vidrio volcánico). No hay evidencias del desarrollo de la RAS. Se observan escasas microfisuras de poca apertura en la pasta que no afectan las partículas del agregado.

En el prisma confeccionado con la arena de la cantera 3, se observó abundante cantidad de cuarzo y feldespatos. Además, se identificaron valvas carbonáticas (algunas de gran tamaño), escasos minerales opacos, areniscas y vulcanitas (algunas con vidrio volcánico). No hay evidencias de desarrollo de la RAS. Se observan escasas microfisuras de poca apertura localizadas en la pasta, aunque no afectan las partículas del agregado fino.

La Figura 5c corresponde al prisma realizado con la arena de la cantera 4. Se observaron varias microfisuras en la pasta que ocasionalmente se continúan en las partículas del agregado. En algunos sectores se bifurcan logrando una configuración que se puede asemejar al desarrollo tipo “mapa” (característico de la RAS). La arena tiene mayor contenido de vulcanitas vítreas que las descritas anteriormente, areniscas (algunas con cuarzo microcristalino), calcedonia, y trizas de vidrio fresco y parcialmente alterado. Además, posee cuarzo, feldespatos, rocas graníticas y escasas valvas carbonáticas.

En la Figura 5d se muestra un sector del prisma confeccionado con la arena de la cantera 5. Tiene abundante microfisuramiento que afecta tanto a la pasta como a las partículas del agregado. Puede observarse, que las microfisuras parten de los agregados y se propagan hacia la pasta y en muchos sectores, puede observarse un material birrefringente relleno dichas microfisuras. En su composición predominan las vulcanitas con pastas vítreas, aunque también se identificó vidrio volcánico fresco como partículas individuales (trizas).

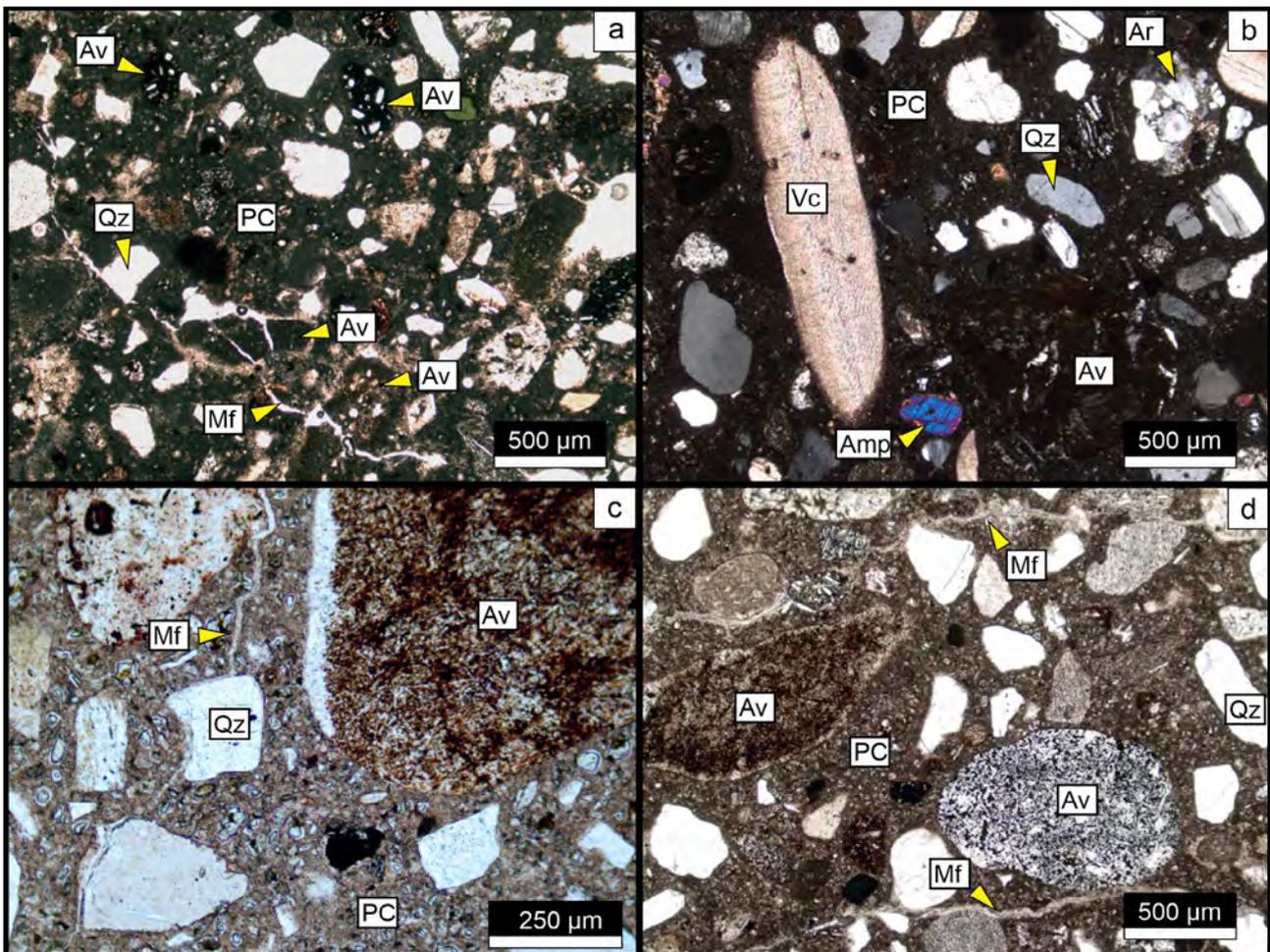


Figura 5. Fotomicrografías obtenidas durante el estudio petrográfico del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 60 °C. a. Cantera 1. b. Cantera 2. c. Cantera 4. d. Cantera 5. Av: agregado volcánico, Mf: microfisura, Qz: cuarzo, PC: pasta de cemento, Vc: valva carbonática, Amp: anfíbol, Ar: arenisca.

### Prisma de hormigón convencional (IRAM 1700, 2013) a 38 °C.

Los resultados obtenidos en los prismas de hormigón (método convencional) para las muestras de las canteras 1, 2 y 3 son similares a los observados en el ensayo acelerado. No hay evidencias de reacción. En la Figura 6a, se observa el hormigón de la cantera 1. Son abundantes las trizas de vidrio y vulcanitas vítreas como componentes potencialmente reactivos, aunque no hay microfisuramiento ni evidencias de reacción. El mortero está sano. En la Figura 6b se muestra las características del prisma realizado con la arena de la cantera 2. Se observan microfisuras de poco espesor en la pasta asociadas en general a las vulcanitas sin continuidad en los agregados. La Figura 6c corresponde al prisma confeccionado con el agregado de la cantera 4. Es abundante el contenido de vulcanitas y de vidrio volcánico fresco, aunque no hay evidencias de reacción. En la Figura 6d se muestra las características del prisma realizado con la arena de la cantera 5. El microfisuramiento es muy marcado, afecta a la pasta y a las partículas del agregado fino, en especial a las vulcanitas.

### DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los agregados finos de las canteras estudiadas fueron calificados en estudios previos (Berezosky et al., 2016) como potencialmente reactivos según el método acelerado de la barra de mortero. Además, al identificarse más de un componente potencialmente reactivo en todas las muestras mediante el examen petrográfico, corresponde calificarlas como potencialmente reactivas en función de los criterios de la norma (IRAM 1700, 2013). Sin embargo, el método del prisma de hormigón es el ensayo más confiable para determinar la potencial reactividad de un agregado frente a la RAS, por lo tanto, tiene prelación sobre el resto de los ensayos. De los estudios realizados, se puede concluir que solo las arenas de la cantera 5 superaron ampliamente (0,392 %) el límite máximo de expansión al año en el prisma convencional, mientras que en el prisma acelerado lo hicieron los agregados de la cantera 4 y cantera 5 (0,082 % y 0,391 % respectivamente a las 13 semanas).

Si se analizan los componentes potencialmente reactivos de las arenas estudiadas (Figura 7), se puede observar que el contenido de rocas volcánicas ácidas es mucho más

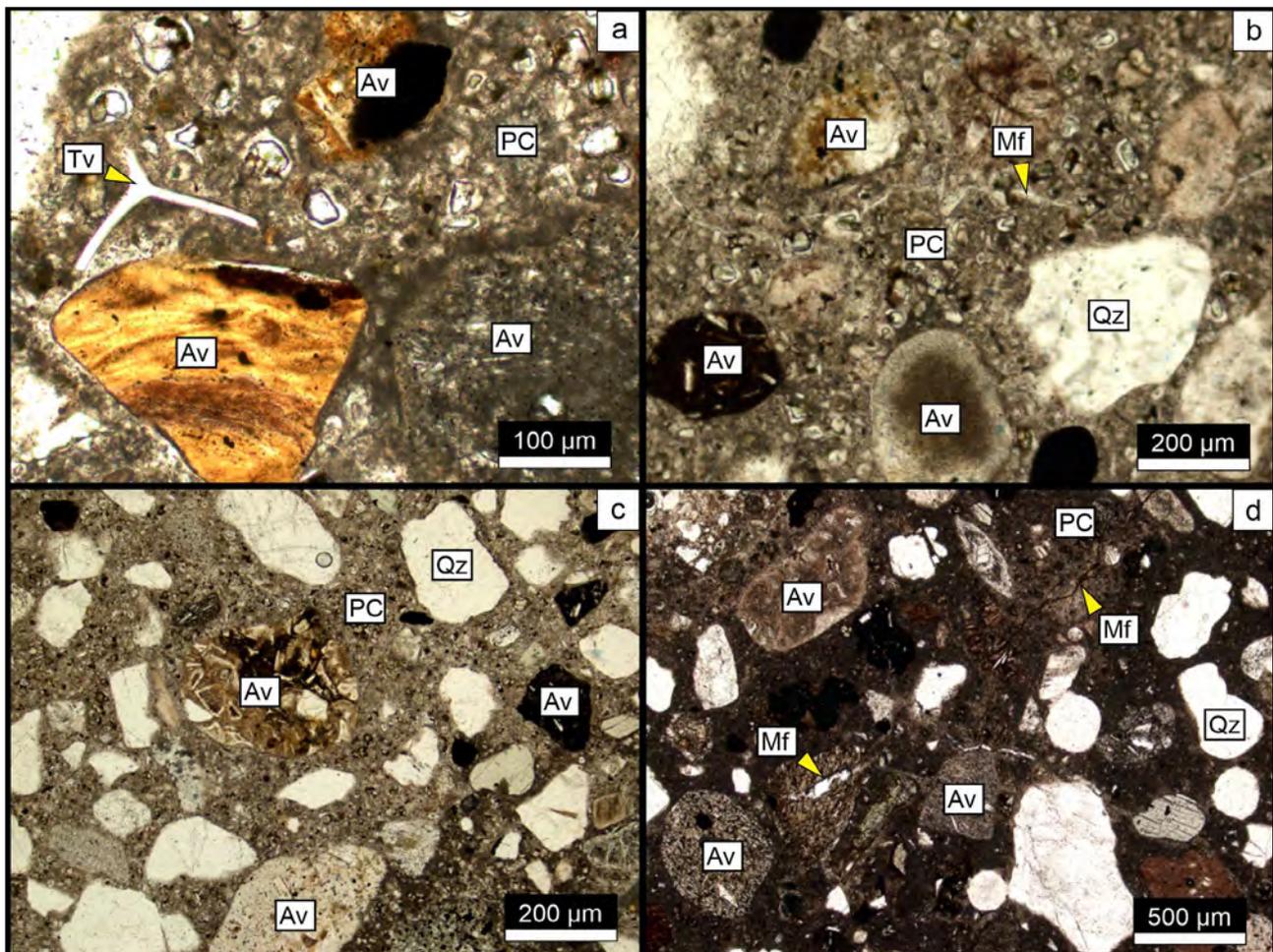


Figura 6. Fotomicrografías obtenidas durante el estudio petrográfico del prisma de hormigón (IRAM 1700, 2013) a 38 °C. a. Cantera 1. b. Cantera 2. c. Cantera 4. d. Cantera 5. Tv: triza de vidrio volcánico, Av: agregado volcánico, Mf: microfisura, Qz: cuarzo, PC: pasta de cemento.

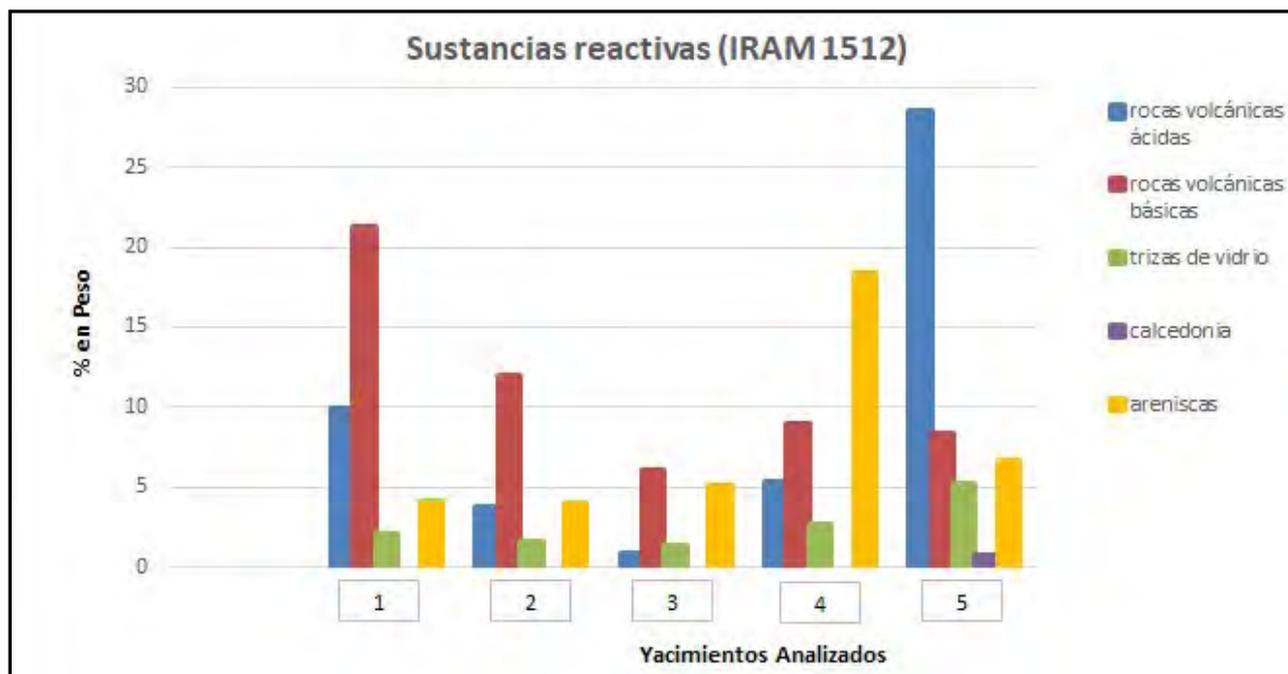


Figura 7. Porcentaje en peso de los componentes potencialmente reactivos determinados en las canteras estudiadas.

elevado en la cantera 5, con respecto al resto. Si además se considera el porcentaje de trizas de vidrio (mayor al 5 %) y calcedonia, se puede concluir que 1/3 de los componentes de esta arena son calificados como potencialmente reactivos. Esto se vio reflejado en la expansión registrada en los ensayos físicos antes descriptos. Si bien la expansión medida con el método acelerado de la barra de mortero (Berezosky et al., 2016) superó el límite máximo establecido en la norma IRAM 1674 (1997), en todas las canteras, los agregados de la cantera 5 evidenciaron el valor más elevado (0,677 %).

De las canteras restantes, la 4 es la que presenta mayor contenido de vidrio, y mostró una expansión superior al límite máximo en el ensayo del prisma acelerado. El contenido de componentes reactivos en el resto de las rocas es variable ya que depende del porcentaje de vidrio en las vulcanitas y del cemento con sílice criptocristalina en las areniscas.

Los resultados de los ensayos ponen en relevancia la importancia de realizar estudios complementarios e interdisciplinarios a la hora de calificar la reactividad de los agregados pétreos, a la vez de identificar las causas de los comportamientos observados. Esto resulta fundamental para definir medidas que permitan la utilización de este tipo de materiales. Como ejemplo, se puede mencionar la utilización de puzolanas naturales procedentes de la provincia de Mendoza en reemplazo parcial del cemento (30 %), mostrando ser efectiva para inhibir la reacción de los agregados de la cantera 5 (Berezosky et al., 2022). Sin embargo, es importante continuar los estudios en búsqueda de nuevas estrategias de mitigación que posibiliten la utilización de las arenas del sector, a la vez de ser estrategias económicamente viables.

## CONCLUSIONES

Desde el punto de vista petrográfico las arenas de las cinco canteras analizadas, a pesar de tener diferentes orígenes, tienen en común las mismas especies deletéreas frente a la RAS: vidrio volcánico, como trizas de vidrio fresco y en la mesostasis de algunas rocas volcánicas. A partir de ello, se puede concluir:

- Si bien las arenas de todas las canteras analizadas se califican como potencialmente reactivas según el ensayo petrográfico y en el método acelerado de la barra de mortero, en el prisma de hormigón (convencional), las arenas de las canteras 1, 2, 3 y 4 presentaron expansiones inferiores a los límites establecidos en la norma IRAM 1512 (2013), por lo que se califican como no reactivas.

- La arena de la cantera 5 arrojó resultados por encima de los límites establecidos por todos los métodos de ensayos normalizados para evaluar la potencial reactividad frente a la RAS por lo que se califica como potencialmente reactiva.

- Las arenas de la cantera 4 se calificaron como potencialmente reactivas según el ensayo del prisma de hormigón acelerado, aunque en el prisma convencional la expansión al año no superó el límite máximo. Esta diferencia en la calificación de la arena con el método del prisma de hormigón, curado acelerado o convencional, puede estar atribuida al porcentaje de no coincidencia entre ambos curados. En estas situaciones, tiene prelación el curado tradicional, por lo tanto se considera a este agregado como no reactivo.

- Es importante remarcar que para el caso de agregados finos de reacción rápida como los estudiados en este trabajo (arenas con elevado contenido de vidrio volcánico), el método acelerado de la barra de mortero puede arrojar

resultados falsos positivos, por lo que es importante realizar ensayos complementarios que permitan verificar este comportamiento. En este sentido, el método del prisma de hormigón convencional tiene mejor desempeño por las condiciones de curado utilizadas, aunque los resultados se obtienen a un año de ensayo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Vialidad, Distrito 19, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, al Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas-Universidad Nacional de Córdoba), a la Universidad Nacional del Sur, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires y al LEMIT por el apoyo

brindado. Además, los autores agradecen a los revisores del trabajo por sus comentarios, los cuales mejoraron el manuscrito.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización - Análisis de datos: Berezosky, Marfil, Locati y Falcone; Metodología: Berezosky y Falcone; Redacción - preparación del borrador original: Berezosky y Marfil; Redacción - revisión y edición: Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Batic, O.R., Wainsztein, M. y Iñiguez, A. (1974). Estudios y experiencias sobre agregados para hormigones empleados en la zona de Bahía Blanca en relación a la reactividad alcalina potencial. *Anales LEMIT, Vol. 1, 1-10*.
- Berezosky, J., Falcone, D., Locati, F., Madsen, L. y Marfil, S. (2016). Evaluación de la potencial reactividad de arenas utilizadas como agregado fino en la zona de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. *21° Reunión Técnica y VII Congreso Internacional de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*, (pp. 357-364).
- Berezosky, J., Lescano, L., Locati, F., Maiza, P. y Marfil, S. (2015). Behaviour of reactive sands in concrete. A case study. *International Conference on Sustainable Structural Concrete*, (pp. 349-358).
- Berezosky, J., Locati, F., Falcone, D., Marfil, S. y Coelho dos Santos, G. (2022). Use of zeolite-bearing pozzolan to inhibit the reactivity of a sand from Argentina. *16th International Conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete, 2nd Ed.*, (pp. 227-234).
- Berezosky, J., Marfil, S. y Lescano, L. (2017). Análisis petrográfico de las arenas del sur de la provincia de Buenos Aires. Factibilidad de uso como agregado en hormigón. *3er Congreso Argentino de Áridos*, (pp. 75-79).
- Berezosky, J., Marfil, S. y Di Sciuillo, N. (2018). Evaluación del deterioro de pavimentos de hormigón de rutas interurbanas de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires). *VIII Congreso Internacional, 22ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*, (pp. 449-456).
- Falcone, D. (2013). *Antecedentes y metodología de ensayo para evaluar la reacción álcali-sílice*. Tesis de Magister inédita. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- IRAM, 1512 (2013) *Agregado fino para hormigón de cemento*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1637 (1966). *Reacción álcali-agregado. Método de la barra de mortero para la determinación de la reactividad alcalina potencial*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1649 (2008). *Examen petrográfico de agregados para hormigón*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1650 (1968). *Agregados. Reactividad alcalina en áridos. Método de ensayo químico*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- IRAM, 1674 (1997) *Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).

- IRAM, 1700 (2013) *Agregados. Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón, debido a la reacción álcali-agregado*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM).
- Maiza, P., Marfil, S., Sota, J. y Batic, O. (1988). Comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de reactividad potencial alcalina en áridos finos utilizados en Bahía Blanca y Punta Alta, Prov. de Buenos Aires. *II Jornadas Geológicas Bonaerenses*, (pp. 697-709).
- Marfil, S. 1989. *La reacción álcali agregado. Investigación de la reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento, utilizados en Bahía Blanca y su zona de influencia*. Tesis Doctoral inédita. Universidad Nacional del Sur.
- Señas, L., Maiza, P., Priano, C. y Marfil, S. (2010). Patologías desarrolladas en una estructura de hormigón en zona marítima. *VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras (CINPAR)*, (pp. 1-14).
- Sims, I. y Poole, A.B. (2017). *Alkali-aggregate reaction in concrete: A World Review*. CRC Press. Taylor & Francis Group.