

Uso de nuevas tecnologías en la prospección de recursos hídricos. Caso de estudio: Karst de la Formación Polanco, Uruguay

New technologies in water resources exploration.

Study Case: karst of the Polanco Formation– Uruguay

González Carreira, Leticia Ivón (1); Gaucher, Claudio (2); Collazo, Paula (2); Segovia, Daniel (1); Montañó, Jorge (3).

(1) Centro Universitario Regional del Este (CURE), Universidad de la República (UdelaR), Rocha, Uruguay.

(2) Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad de la República (UdelaR), Uruguay.

(3) GeoAmbiente, Uruguay.

Contacto: letigon@fcien.edu.uy

RECIBIDO: 31/3/2017 – APROBADO: 7/6/2017

Resumen

Antecedentes hidrogeológicos motivaron el desarrollo de modelos prospectivos de aguas subterráneas en rocas carbonáticas de la Formación Polanco (Ediacárico). Se realizó relevamiento de campo, fotográfico (SGM, Google Earth y Drone Phantom 2 Vision+), y se generaron modelos 3D de terreno para interpretar las características morfo-estructurales del relieve kárstico. Se relevaron perforaciones y datos geoelectrónicos. Se complementaron técnicas prospectivas habituales con tecnologías de acceso remoto al terreno, para generar un modelo prospectivo específico para estas litologías. Como resultado se constató la existencia de pliegues que generan un relieve invertido con dolinas tipo «taza» y «tubo», un relieve kárstico tipo lapiaz, tres manantiales y el desarrollo de pozos con un caudal promedio de 30 m³/h. La composición hidrogeoquímica corresponde a aguas bicarbonatadas – cálcicas de calidad de agua mineral natural.

Palabras clave: Carbonatos, kárstico, manantiales, Drone, agua mineral.

Abstract

The hydrogeological background in Polanco formation (Ediacaran) has raised interest regarding the development of prospective models of groundwater flow. Field survey and photographic analysis (SGM, Google Earth and Drone Phantom 2 Vision+) were carried out to generate a 3D digital model of the geographical area in order to understand the morphostructural features of karstic relief. Drilling data and geoelectric studies were also examined. Regular prospective techniques were complemented with remote access technologies, aiming to generate a specific prospective model for these lithologies. As a result, folds with inverted relief including sinkholes, limestone pavements, springs and wells with an average production of 30 m³/h. Hydrogeochemical analysis of groundwater shows dominant calcium-bicarbonate composition alike natural mineral water.

Keywords: Carbonates, karstic, springs, Drone, mineral water.

Introducción

Los acuíferos kársticos presentan un notable interés económico ya que la infiltración en rocas carbonáticas suele ser superior a la de los sedimentos detríticos, lo que resulta en aguas de muy buena calidad y caudales significativos. La circulación del agua en estos acuíferos ocurre mediante el desarrollo de porosidad secundaria, a través de estructuras de disolución de rocas carbonáticas (tubos verticales, huecos y cavernas) (Custodio y Llamas, 1983). Las formas kársticas superficiales se generan a partir de la disolución de los carbonatos, configurando un modelado del terreno denominado «paisaje kárstico». Así como estas estructuras se manifiestan superficialmente, también existe un modelado subterráneo que las acompaña. Algunas de las formas más comunes son:

lapiaz, dolinas, úvulas, poljes y ponor (Huizar Álvarez y Oropeza Orozco, 1989). Los karsts presentan vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, debido a la importante infiltración y la velocidad de circulación del agua en estos sistemas, donde eventos de contaminación puntual pueden generar plumas de rápido avance en grandes extensiones geográficas. En Uruguay, el Grupo Arroyo del Soldado (GAS) corresponde a una sucesión plataformal marina preservada como cobertura del Terreno Nico Pérez (TNP; Gaucher, et al., 1996; Gaucher, 2000) de edad Ediacárico tardío (Gaucher, et al., 2004b, 2007, 2009; Blanco, et al., 2009; Frei, et al., 2011) a Cámbrico Inferior (Sprechmann, et al., 2004) (Figura 1). El GAS está integrado entre otras por la Formación Polanco (FP), una de las unidades de mayor extensión geográfica del GAS, representada por potentes depósitos carbonáticos de

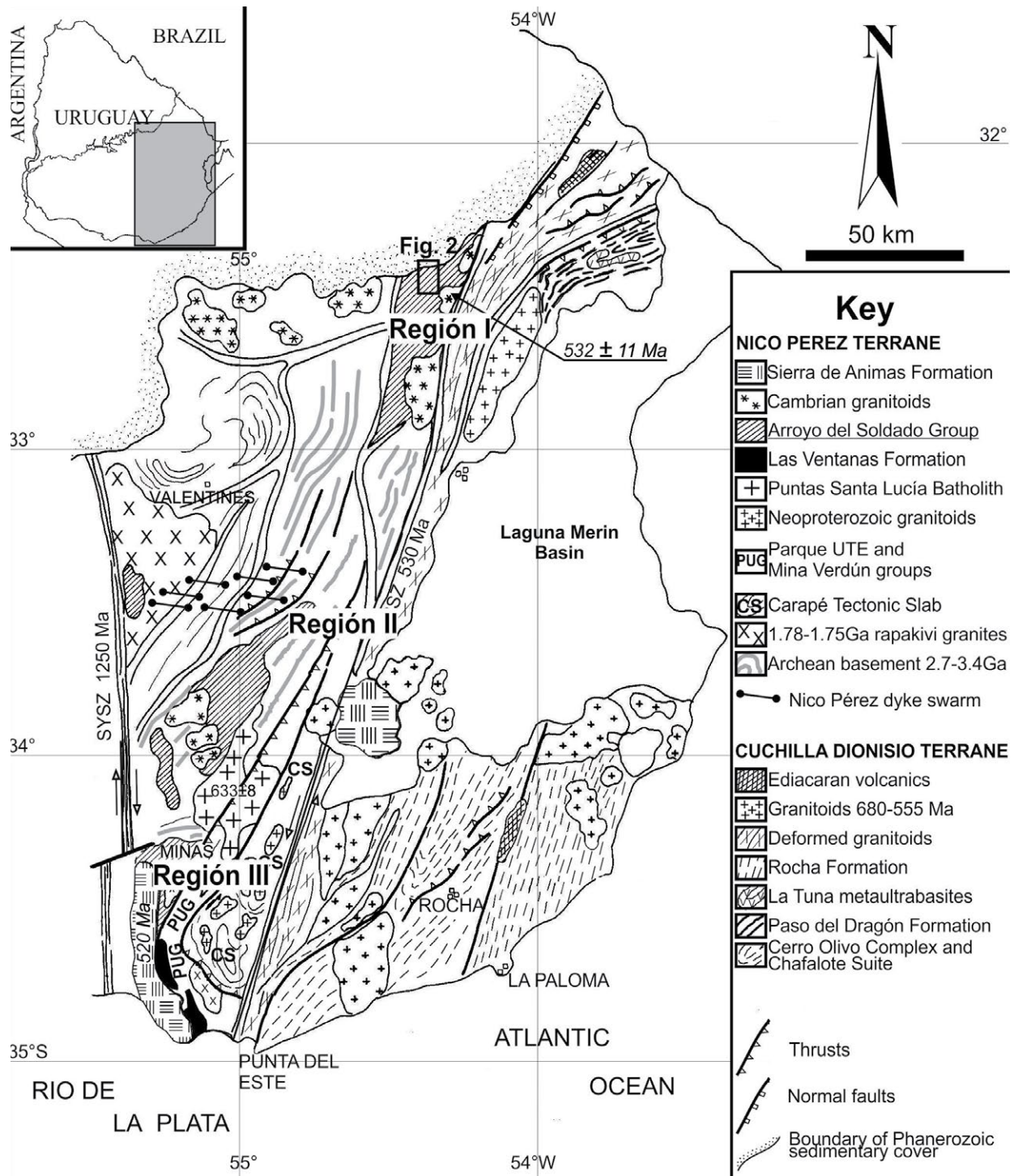


Figura 1. Mapa geológico del Terreno Nico Pérez con las áreas de afloramiento del Grupo Arroyo del Soldado. Se observan las regiones donde se hicieron estudios a detalle (Bossi y Gaucher, 2004; Frei, et al., 2011).

hasta 900 m de espesor, cuyas facies predominantes son las ritmitas caliza-dolomía, si bien también ocurren las calizas y las dolomías puras (Gaucher, et al., 1996, 1998, 2004a, 2009; Gaucher, 2000, 2014). En superficie estas áreas calcáreas están karstificadas y presentan una cobertura de suelos rojos («terra rossa»), a veces de varios metros de potencia (Preciozzi, et al., 1988). La Formación Polanco es de relevancia como fuente de recursos minerales, tanto las calizas para la producción de cemento y cal, como las cada vez más valiosas aguas minerales,

que motiva a empresas de prestigio nacional e internacional a desarrollar sus fuentes de explotación en estas litologías. En igual sentido, Bossi y Navarro (2000) caracterizan una serie de provincias hidrogeológicas para Uruguay; para la región este identifican bancos carbonáticos con variación en el relieve, en la fracturación, en los caudales puntuales y en la surgencia, aunque la composición química de las aguas se mantiene constante. Esto indica que las condiciones son propicias para su explotación.

Estas evidencias motivaron la realización de un estudio en detalle sobre las características de las estructuras de los carbonatos de la Formación Polanco, aplicando tecnologías innovadoras que permitieran abordar con integralidad las áreas seleccionadas para esta investigación.

El objetivo general de este trabajo fue identificar las condiciones geológicas que permiten la generación de un acuífero kárstico y fuentes de agua mineral utilizando herramientas de relevamiento de terreno.

Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Estudiar la geología en detalle de la Formación Polanco en los departamentos de Treinta y Tres y Lavalleja mediante fotointerpretación, trabajo de campo y relevamiento fotográfico de un dron.
- Determinar las características hidráulicas del acuífero y las condiciones geológicas que permiten la acumulación del recurso.
- Elaborar un modelo prospectivo para aguas minerales en carbonatos de la Formación Polanco.

Materiales y Métodos

Se consideraron para este estudio tres regiones donde aflora la Formación Polanco, en los departamentos de Treinta y Tres y Lavalleja, que de norte a sur se identifican como:

- Región I: Sinclinal del Este (Preciozzi, et al., 1988; Gaucher, 2000).
- Región II: Sinclinal del Arroyo Tapes Grande (Gaucher, 2000).
- Región III: alrededores de la ciudad de Minas (Gaucher, et al., 2004).

Fase de gabinete

Para el estudio geológico, estructural y geomorfológico se realizó la fotointerpretación a escala 1/20.000 de las fotos aéreas (133-074 a la 076; 177-140 a la 14135-152 a la 154) del Plan Cartográfico del Servicio Geográfico Militar (SGM) del año 1966-67, así como el análisis de imágenes satelitales obtenidas a través del programa Google Earth.

Fase de campo

Se realizó el relevamiento geológico y geomorfológico de las áreas de estudio, atendiendo especialmente la geología estructural (pliegues, fallas, diaclasado) y las geoformas kársticas. Se sobrevoló a 150 m de altura las regiones estudiadas con un dron (DJI Phantom II Vision +) (Figura 2) y se obtuvieron ortofotos con solapamiento de un 60 %. Fueron relevadas las perforaciones en el área y se determinó su profundidad, nivel piezométricos, caudal y posición en el terreno. Se emplearon datos geoelectrónicos S.E.V. (sondeos eléctricos verticales), proporcionados por la empresa consultora GeoAmbiente, que permitieron interpretar información obtenida en campo.

Tratamiento de datos

Para el diseño de mapas geológicos-estructurales se utilizó el programa Map Info-Discover (versión 10.5), junto con datos

de fotos aéreas e imágenes satelitales de Google Earth Pro. En el procesamiento de los datos estructurales se empleó el programa StereoNet (versión 1.0.1).



Figura 2. Dispositivo aéreo no tripulado (DRONE DJI - Phantom II Vision +).

El análisis morfoestructural se completó con el estudio de la geomorfología de las áreas mediante un modelo digital de terreno 3D generado a partir de las imágenes obtenidas mediante el vuelo del dron, aplicando el software Agisoft Photoscan. Para la realización de los diagramas y el tratamiento de las imágenes tomadas a las estructuras y afloramientos fueron empleados los programas Corel Draw X6 y Adobe-PHOTOSHOP.

Resultados

Se presentan los resultados obtenidos mediante el relevamiento sobre el terreno. Se incluye la descripción de afloramientos, fotolectura, análisis de los modelos 3D de terreno, cortes geológicos, estudio de lineamientos de la red de drenaje, fracturas, cabalgamientos y aspectos geomorfológicos característicos del relieve de un sistema kárstico.

Geología y geomorfología

Región I

Las litologías que conforman el Sinclinal del Este corresponden a las formaciones Yerbal, Polanco y Cerro Espuelitas, desde la base hacia el tope y constituyen el pasaje transicional. La Formación Polanco está representada por bancos de calizas puras, calizas dolomíticas e intercaladas con calcoarenitas. Es un pliegue Sinclinal recumbente, con plano axial N45°E, buzando entre 35° y 40° al NW. Operan cabalgaduras con vergencia al SE, que generan límites marcados al N y S del área del sinclinal (Figuras 3 y 4). Desde el NW hacia el SE se realizó un corte geológico sobre el área del sinclinal, donde se aprecia la disposición de las unidades y las estructuras que operan (Figura 5). La dirección del corte geológico corresponde al sector donde se cuenta con datos de sondeos verticales e hidrogeológicos. El análisis de los lineamientos se complementó con diagramas de rumbos (Figura 6). La dirección predominante corresponde a N 35° a 45° E, valor que coincide con el rumbo de los cabalgamientos en los sectores NW y SE del área y con la dirección del eje del pliegue. En menor proporción se observan lineamientos con rumbo N 60° a 70° E.

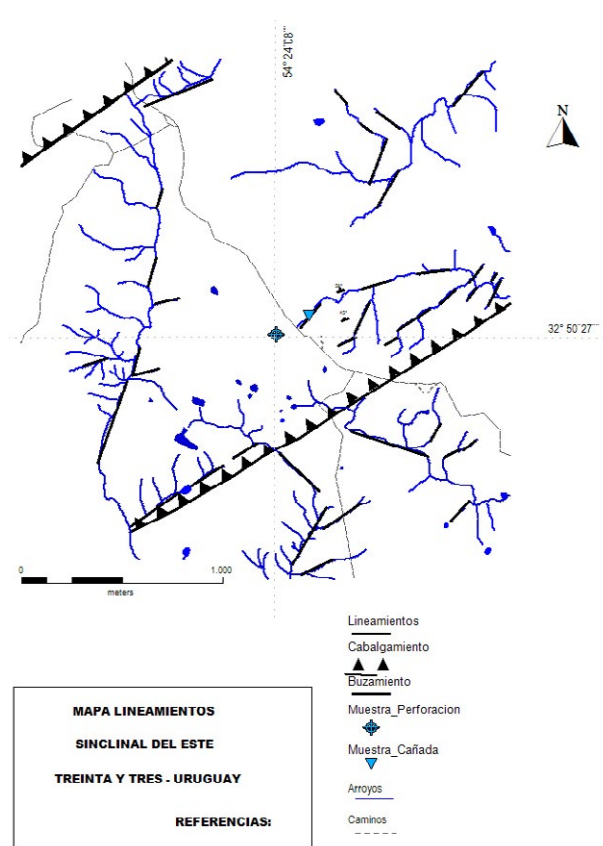
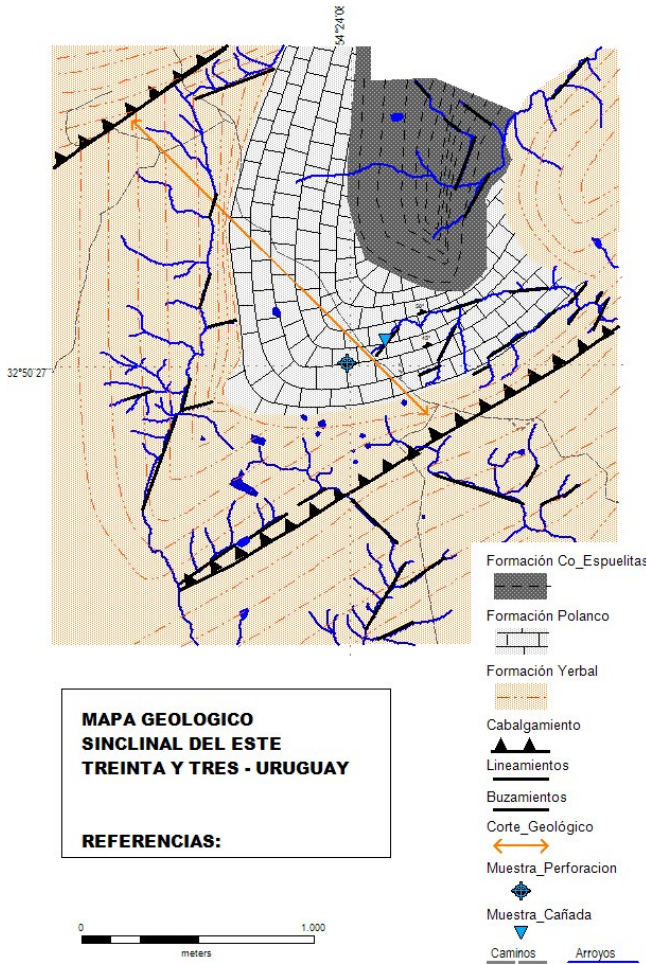


Figura 3. Mapa geológico de la Región I (Sinclinal del Este), Treinta y Tres.

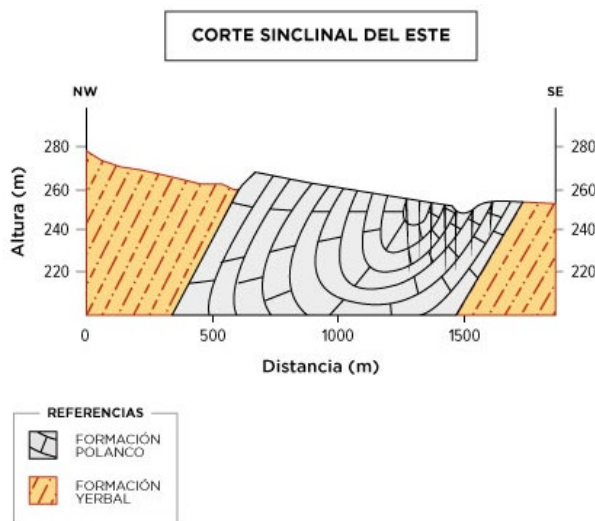


Figura 5. Corte geológico de la región I (Sinclinal del Este), Treinta y Tres.

Figura 4. Mapa de lineamientos de la Región I (Sinclinal del Este), Treinta y Tres.

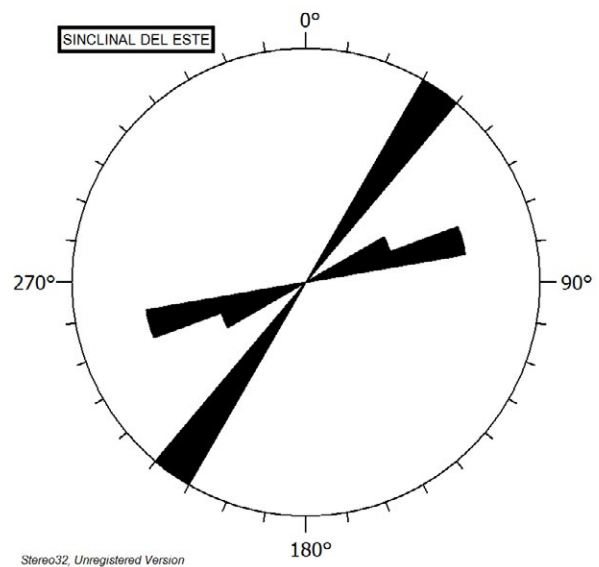


Figura 6. Rosa de rumbos de lineamientos para la Región I, Sinclinal del Este, Treinta y Tres. La dirección N 35° a 45° E corresponde al eje del sinclinal, estructura sobre la cual se desarrolla la perforación Sinclinal del Este 1 y a los cabalgamientos que se indican en la cartografía. La dirección N 60° a 70° E corresponde a fallas de menor presencia en el área.

En primera instancia, las estructuras en superficie se consideran posibles manifestaciones superficiales de la existencia de un sistema kárstico. Estas estructuras son relevantes en este estudio y corresponden a cuerpos de agua temporales («ojos de agua»), los cuales se disponen en su mayoría sobre los metasedimentos de la Formación Yerbal. En las imágenes tomadas por el *drone* se pudo corroborar el aspecto temporal de estos cuerpos de agua, ya que en las fotos aéreas del año 1966-1967 la distribución de los «ojos de agua» también difiere con imágenes satelitales históricas registradas en Google Earth. Se constató que la mayor concentración de este fenómeno de acumulación de agua ocurre sobre las pelitas de la Formación Yerbal (Figura 7). Los datos proporcionados por el SEV indican que estos «ojos de agua» corresponden a manifestaciones superficiales, ya que esa agua se acumula en una zona plana sobre un sustrato de baja permeabilidad con un espesor de 20 metros y estos materiales resultan poco favorables para la circulación del agua en dirección vertical. En otras palabras, se trata de acumulaciones de aguas pluviales.



Figura 7. Cuerpos de agua temporales desarrollados sobre la Formación Yerbal, próximos al contacto con los carbonatos de la Formación Polanco en el Sinclinal del Este. Foto tomada desde el *drone* (coordenadas al centro de la foto: X: 32°50'36'', Y: 54°24'10'', fecha: 19/9/15).

En el área de afloramiento de los carbonatos se observa el desarrollo de depresiones en el terreno que se disponen respetando determinado patrón lineal. Estas estructuras fueron corroboradas y se registraron con un padrón de escala de referencia. La dirección de estas estructuras corresponde al rumbo N 40° E, valor que coincide con la dirección que prevalece en el diagrama de la rosa de lineamientos y con el rumbo del eje del pliegue y los cabalgamientos que afectan este sector. Las dolinas son estructuras exokársticas que se caracterizan por ser depresiones en la superficie del terreno que se comportan como áreas de infiltración, ya que se comunican con el drenaje subterráneo y, según su morfogénesis, pueden ser clasificadas en diferentes tipos (Huizar y Oropeza, 1989). En la Región I se identificó un relieve kárstico de buen desarrollo asociado a las calizas de la Formación Polanco, con estructuras de disolución evidentes. Se registraron estas estructuras en superficie mediante foto en planta e imágenes obtenidas por el *drone* (Figura 8). Se identificaron dolinas tipo «taza» donde se observan los procesos de disolución y subsidencia con el desarrollo de suelos tipo «terra rossa». Estas estructuras están asociadas a un control estructural vinculado a la dirección del eje del pliegue del Sinclinal del Este. La concentración de dolinas tipo «taza»

está asociada a la dirección N 40° a 45° E que corresponde a la dirección del eje del pliegue. Los modelos digitales de terreno generados a partir de las imágenes capturadas por el *drone* permiten obtener una visión panorámica de estas estructuras kársticas. Morfoestructuralmente, este pliegue constituye un relieve deprimido, que alberga las depresiones kársticas en la dirección N 40° a 45° E. Los datos registrados con el SEV indican que próximo a este sector las condiciones de subsuelo son favorables para hallar aguas subterráneas, ya que los valores de resistividad descienden indicando una elevada permeabilidad, en torno al nivel -60 m (Montaña, J., com. pers., julio de 2015).

En segunda instancia, se identificaron estructuras de disolución en calizas del Sinclinal del Este, con aparente desarrollo vertical mayor que el diámetro de apertura en superficie, donde la corrosión vertical se profundiza y es posible encontrar bloques colapsados desde sectores más profundos en el sector deprimido. Estas estructuras deprimidas se clasificaron como dolinas tipo «pozo»; varias se encuentran descubiertas y otras han sido aprovechadas por el monte nativo para implantarse y desarrollarse en estas cavidades profundas (Figura 9).

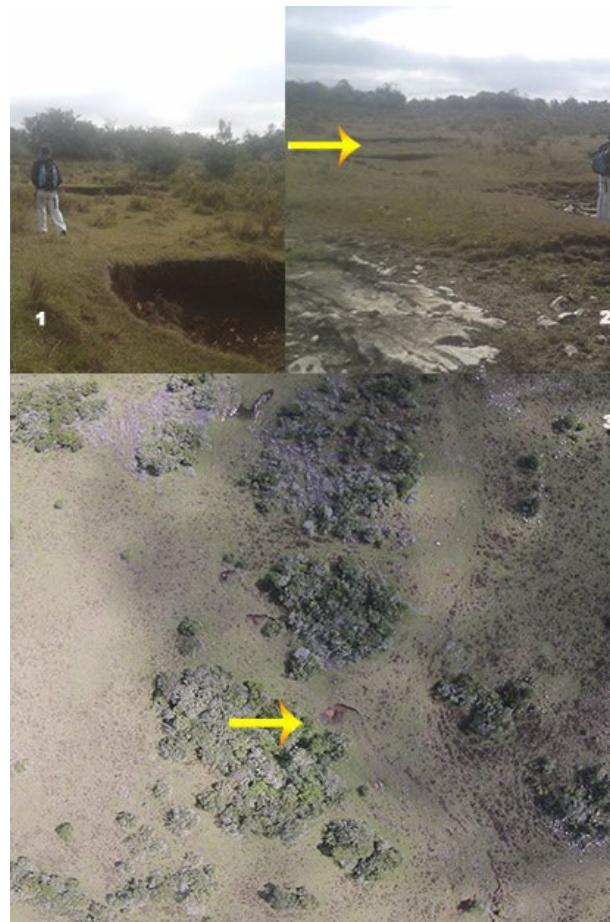


Figura 8. Distribución de estructura de depresión del terreno (Dolinas tipo «taza»), acompañan el rumbo N 45° E. Sinclinal del Este, Treinta y Tres. Dolinas tipo «taza» observadas en planta (1 y 2). Secuencia de Dolinas tipo «taza» observadas con imágenes *drone* (3) (coordenadas: X: 32°50'22'', Y: 54°24'10'', fecha: 19/9/15).



Figura 9. Diversidad de formas de relieve kárstico conformando dolinas tipo «pozo». Para 1 y 2 no fue posible alcanzar la base de la depresión. En 3 se observa la base del orificio cerca de la superficie, generando las condiciones para la implantación de retoños de monte nativo. En 4 se observa la corrosión en superficie de las calizas, con sectores de colapso en la estructura, y al fondo se ve el desarrollo de monte nativo sobre este tipo de estructuras. Se observa el color gris oscuro característico de las calizas.

Región II

La Formación Polanco se caracteriza por ritmitas de intercalación milimétrica a centimétrica de calizas y dolomías en esta región. Sobre estas litologías hay manantiales que se registran en la cartografía. Se desarrollan estructuras cabalgantes con buzamientos casi verticales o de bajo ángulo, de rumbo predominante NE-SW, que afectaron la secuencia sedimentaria (Figura 10). En el mapa de lineamientos se muestran las principales direcciones estructurales sobre la red de drenaje (Figura 11). También se realizó un corte geológico NW-SE, paralelo al desarrollo del cauce del arroyo, para relevar los afloramientos de carbonatos que se disponen en esa dirección (Figura 12).

La dirección de mayor presencia es N 50° a 60° E. Se observa este patrón paralelo a la interstratificación de los carbonatos aflorantes. Este fenómeno es un indicio favorable de circulación de agua, ya que en esos planos se observa disolución de carbonatos. Con menor frecuencia se encuentran los lineamientos de dirección N60°W y N - S, asociados a fallas que se observan sobre la red de drenaje (Figura 13). Estas orientaciones se asocian probablemente a la acción de las cabalgaduras con vergencia al NW, que actúan al NW y SE de esta zona y que notoriamente generan un patrón de estructuración intenso.

La distribución de los rasgos estructurales sobre los carbonatos de esta formación permite que se genere una intensa fracturación en superficie. Estas estructuras se registraron en el terreno con imágenes en planta y con el vuelo del *drone*

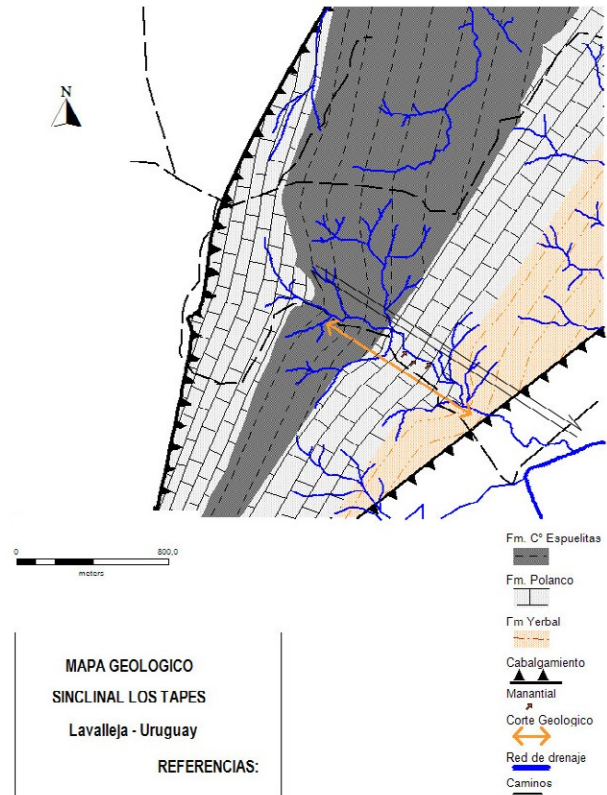


Figura 10. Mapa geológico de la Región II (Sinclinal Tapes Grande), Lavalleja.

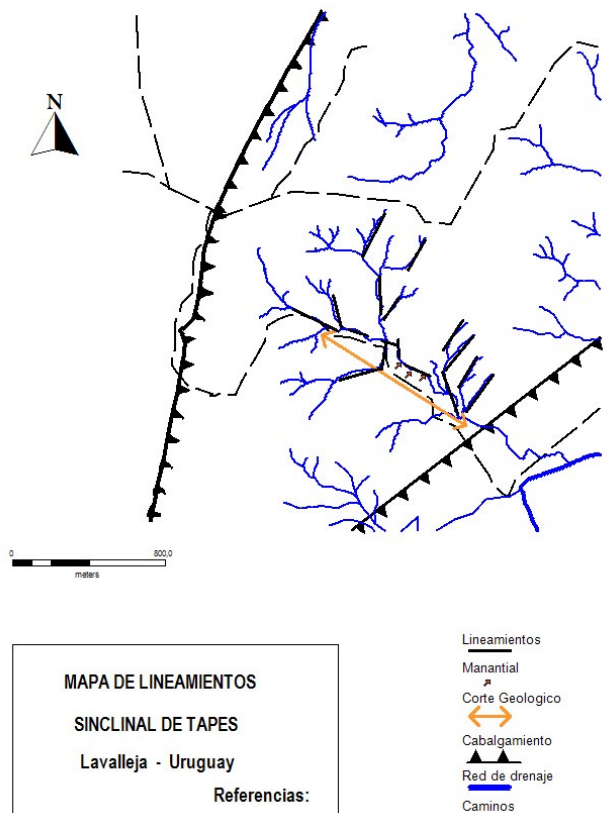


Figura 11. Mapa de lineamientos de la Región II (Sinclinal Tapes Grande), Lavalleja.

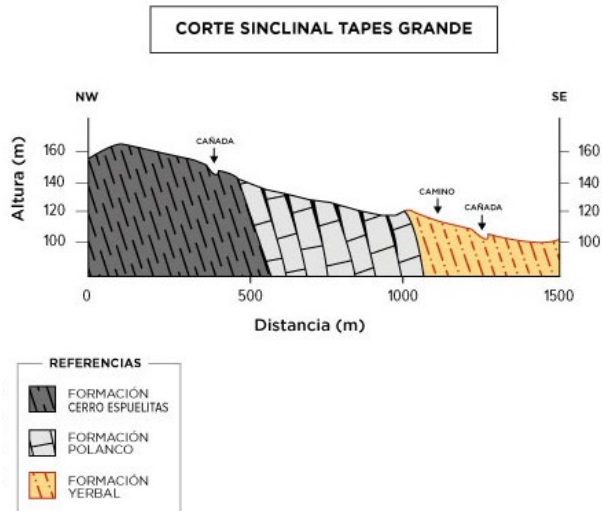


Figura 12. Corte geológico NW-SE (Sinclinal Tapes Grande), Lavalleja.

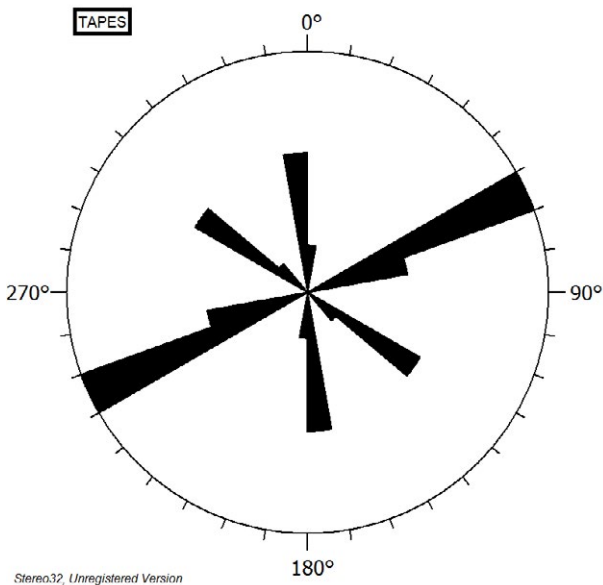


Figura 13. Rosa de rumbos de lineamientos para la Región II, Sinclinal de Tapes Grande, Lavalleja. La dirección N50°-60°E es la de mayor presencia y coincide con la superficie So y se asocia probablemente a la cabalgadura que actúa al SE del área. El valor N 60° W corresponde a fallas transcurrentes que direccionan la red de drenaje. Los lineamientos N-S corresponden a la cabalgadura al NW del área.

(Figura 14). Los modelos digitales de terreno permiten visualizar las estructuras exokársticas que se desarrollan en la superficie de la roca como consecuencia de la erosión del agua, aprovechando fracturas y diaclasas.

Los lineamientos de dirección N60°W relevado sobre la red de drenaje se asocian a fallas transcurrentes. La alineación N60°E coincide con la orientación de la cabalgadura al SE del área y corresponde a la estratificación de las ritmitas carbonáticas. Esta característica favorece al desarrollo de un relieve kárstico tipo Lapiaz. Esta forma de disolución kárstica se caracteriza por presentar en superficie un relieve irregular, producto de la corrosión del agua a través de las discontinuidades (Figura 15).

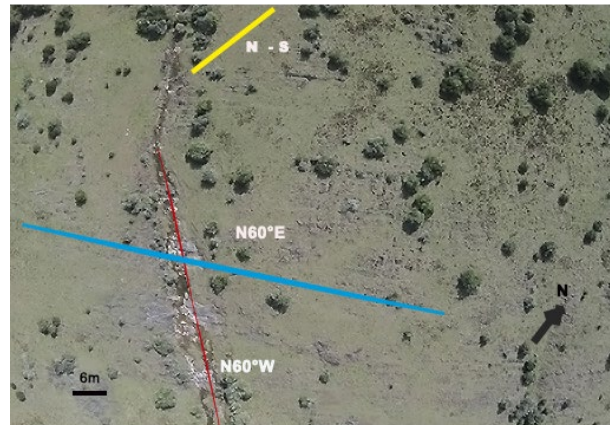


Figura 14. Imagen de *drone* donde se visualizan los lineamientos estructurales en superficie y se observan con claridad la estratificación N60°E y la falla N60°W. Las estructuras N-S se ven suaves sobre el extremo superior de la foto. Sinclinal Tapes Grande, Lavalleja (coordenadas del centro de la foto: X: 33°57'59'', Y: 54°57'36'', fecha: 19/9/15).

Esta forma kárstica superficial se genera por disolución de la roca calcárea y causa surcos paralelos y longitudinales que pueden interferir con las diaclasas y dar lugar a estructuras arborescentes. La ausencia de cobertura edáfica y una pendiente mayor a 10° favorecen la dinámica del sistema (Figura 15; foto 2). También se encuentran hoyos y nichos cilíndricos que se concentran en sectores donde se entrecruzan las estructuras N60°E y N60°W (Figura 15; fotos 1, 3 y 4).



Figura 15. Estructuras kársticas relevadas en afloramientos. Se muestra la concordancia de la estructura con las orientaciones; N60°E coincide con lineamientos y estratificación, N60°W corresponde a fallas que favorecen el desarrollo de estructuras kársticas (fotos 1 y 4). Relieve kárstico de características irregulares en superficie asociado a las diaclasas (foto 2). Estructura kárstica de fractura por diaclasas (foto 3).

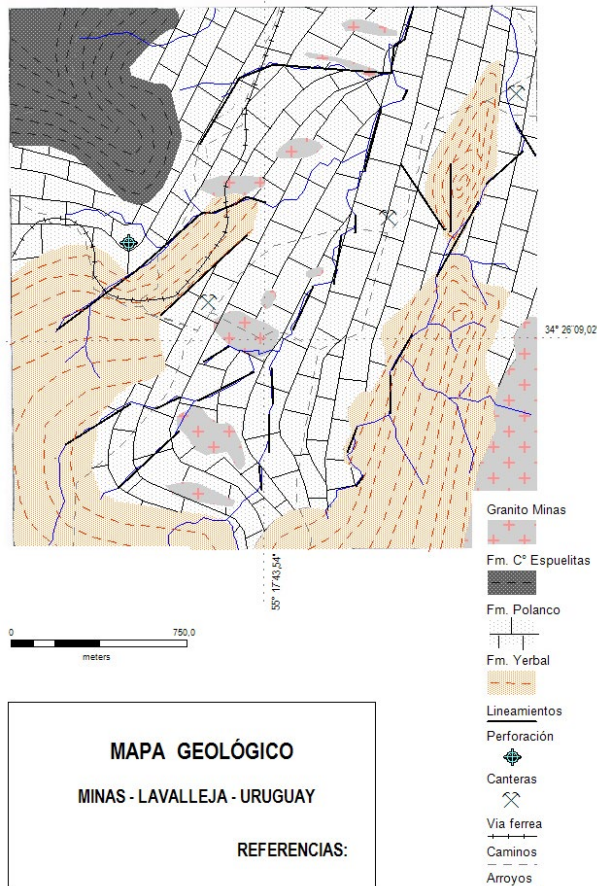


Figura 16. Mapa geológico-estructural de la Región III (Minas). Se muestra la ocurrencia de la secuencia sedimentaria del GAS, particularmente los afloramientos de los carbonatos de la formación Polanco. Ampliado del mapa presentado por Gaucher et al. (2004a).

Región III

Se realizó el relevamiento de fotointerpretación con apoyo de imágenes de Google Earth; no se obtuvieron premisos para aplicar otras técnicas. Al sur de la ciudad de Minas se observó el pasaje transicional de las Formaciones Yermal, Polanco y Cerro Espuelitas (Eldiariario) con intrusiones del Granito de Minas y en contacto tectónico con otras unidades (Gaucher, et al., 2004) (Figura 16). Se reconocieron grandes elevaciones de rumbo NS (ZCSY) y N30°E (Lineamiento Arroyo La Plata) en esta región e intensos plegamientos donde la secuencia sedimentaria del GAS se encuentra afectada.

Hidrogeología

Se tomaron medidas de nivel de agua de cada pozo para un periodo comprendido entre marzo de 2012 y agosto de 2015. Se graficaron estos datos, mostrando el comportamiento del nivel de agua en cada uno (Figura 17). Se compararon las variaciones del nivel de agua en los pozos con el índice de precipitación estandarizado que mide el exceso o déficit de precipitación para un lugar dado en un periodo de tiempo y lo compara con valores históricos del periodo comprendido entre 1981 y 2010 (Figura 18) (Instituto Uruguayo de Meteorología, [s.d.]

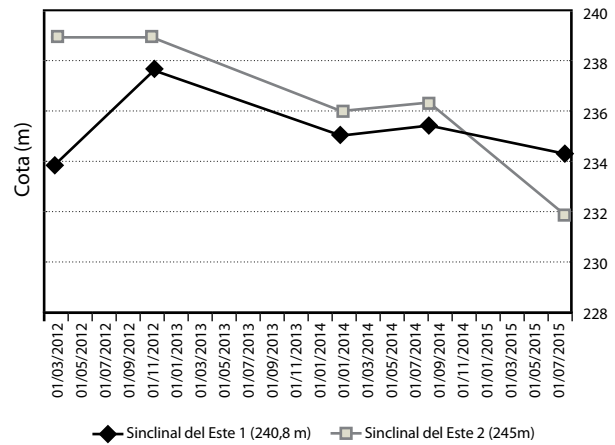


Figura 17. Gráfico de Nivel de agua en dos pozos del Sinclinal del Este, Treinta y Tres. La cota en el terreno para Sinclinal del Este 1 es de 240, 8 m y para Sinclinal del Este 2 es de 245 m.

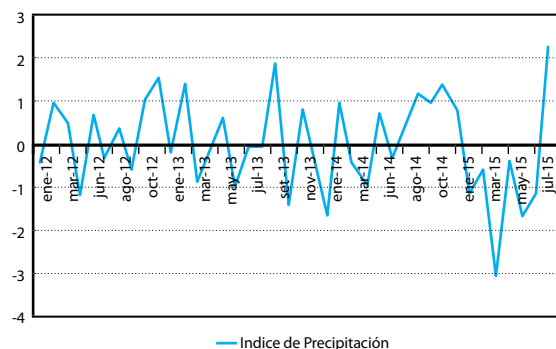


Figura 18. Gráfico de Índice de Precipitación Estandarizado para Treinta y Tres, entre 1/12 y 8/15. Valores mayores que cero indican que la precipitación fue superior al valor normal del lugar, valores menores a cero indican que la precipitación fue menor que el valor estándar.

Se observó que existe relación entre la recarga de los pozos. En el periodo (diciembre 2012 – setiembre 2014) la recarga entre ambos sistemas se mantuvo en relación constante. Luego, la recarga disminuyó sensiblemente: entre febrero y mayo de 2015 hubo un descenso pluviométrico registrado en la región y se observó que el nivel de agua en el pozo 2 descendió con mayor pendiente que el pozo 1. Esto es coherente con la hidrodinámica de los sistemas kársticos: rápida respuesta inicial a la recarga y evolución condicionada por los circuitos de circulación en cada caso. En la región II se registró un sistema de manantiales que surgen a los lados de la red de drenaje en los niveles de ritmitas finas de calizas y dolomías. La red de drenaje responde a un sistema de fallas de dirección N60°W que se superpone a la estratificación N60°E y un tercer evento de dirección N-S afecta estas litologías. Entre la intersección de las estructuras N60°W y N60°E se generan estructuras propias del relieve kárstico como hoyos y nichos cilíndricos. En los niveles de interstratificación de



Figura 19. Manantial surgente en la Región II, Tapes.

calizas y dolomías se da la surgencia natural de aguas subterráneas (Figura 19). Para este sistema se midió el caudal de la surgente, arrojando un valor de 1200 l/h en setiembre de 2014 y en junio de 2015 estos niveles de agua subterránea no se manifestaron en superficie. El descenso del nivel de agua que se registró en boca de pozo en la Región del Sinclinal del Este también se observó, con menor precisión, en la Región del Sinclinal de Tapes con la ausencia de surgentes.

Discusión y Conclusiones

En las tres regiones analizadas la secuencia sedimentaria del GAS está representada por las Formaciones Yerbal, Polanco y Cerro Espuelitas, desde la base hacia el tope, con el pasaje transicional entre cada unidad.

Los carbonatos de la Formación Polanco en la Región I (Sinclinal del Este) y III (Minas) se caracterizan por constituir bancos de calizas, calizas dolomíticas y calcarenitas. En cambio, para la Región II (Tapes) la Formación Polanco está representada por ritmitas de intercalación milimétrica a centimétrica de calizas y dolomías.

En la Región I la Formación Polanco conforma un sinclinal con plano axial N 45° E entre dos cabalgaduras, una al NW y otra al SE, del área de afloramiento. Esta estructura

coincide con los rumbos de los lineamientos registrados sobre la red de drenaje, que oscilan entre N 35° a 45° E. Las Formaciones Yerbal y Cerro Espuelitas se comportan como niveles muy poco permeables hidrogeológicamente. En particular la Formación Yerbal, que se ubica en los niveles topográficos más elevados del área, genera en superficie depresiones en las que se desarrollan cuerpos de agua temporales. Los resultados del SEV indican que no corresponden a manifestaciones superficiales de agua subterránea, ya que el sustrato presenta un nivel que supera los 20 m con valores altos de resistividad.

Cabe resaltar que en este estudio se definen, por vez primera, estructuras kársticas en los carbonatos de la Formación Polanco, cuyas características se detallan a continuación. Se desarrolla un relieve kárstico sobre la Formación Polanco, donde se identifican dolinas tipo «taza» con dirección N 45° E, en igual dirección del eje del pliegue, las estructuras cabalgantes y los principales lineamientos. Se relevaron dolinas tipo «pozo» abiertas con colapso de las estructuras de las que no se alcanzó la base y que permitieron, a su vez, la implantación de monte nativo en los casos en que los orificios estuviesen rellenos. Morfoestructuralmente, el pliegue constituye un relieve deprimido, albergando en las cercanías del plano axial, de dirección N 40° a 45° E, depresiones kársticas, estructuras de circulación y acumulación de agua subterránea. Se estima que el karst en calizas plegadas se desarrolla aprovechando el drenaje de plano axial y es en esta estructura donde se ubica la perforación de caudal 30 m³/h.

En la Región II se desarrollan cabalgaduras de rumbo NE-SW que afectan a la secuencia sedimentaria. De todos modos, los lineamientos N 50° a 60° E son dominantes y corresponden a la So de estratificación de los carbonatos. También se encuentran fallas N 60° W y N-S. A partir de estas estructuras se identifica un relieve kárstico tipo lapiaz con desarrollo de hoyos y nichos cilíndricos, que se concentran en sectores donde se entrecruzan las estructuras N 60° E y N 120°, y tres manantiales donde la So y su intersección con la falla N 60° W, que permiten la surgencia de agua subterránea. En este caso se observa un comportamiento diferente al de las calizas puras, donde el karst aprovecha el clivaje de plano axial. En los carbonatos más dolomíticos, las fallas parecen jugar un papel importante en el desarrollo del karst. Esto responde posiblemente a la diferente reología de la calcita y la dolomita. El esfuerzo necesario para que fluya la dolomita a bajas temperaturas (~ 200 °C) es de 10 órdenes de magnitud superior a la calcita (Delle Piane, et al., 2008). Esto significa que a bajas temperaturas la dolomita presentará deformación frágil, pero la calcita puede deformarse de forma plástica. A temperaturas de 550 – 600 °C, empero, ambas presentan similares valores de esfuerzos de flujo («flow stress»; Delle Piane, et al., 2008).

En todas las regiones el déficit hídrico registrado entre febrero y mayo de 2015 afectó la surgencia, impidiendo su registro en superficie. En las perforaciones en el Sinclinal del Este, el pozo de mayor caudal presentó mayor estabilidad frente a la variación de las condiciones climáticas. Considerando la diferencia de cota en el nivel estático de los pozos Sinclinal del Este se estima que existe independencia en el sistema kárstico del pozo 1 respecto al pozo 2.

Este trabajo representa un paso significativo orientado a la prospección de fuentes de agua con especial énfasis en las aguas minerales de mesa, que constituyen uno de los recursos minerales de Uruguay y su explotación se encuentra en creciente desarrollo nacional, regional y mundial.

Reconocimientos

A PEDECIBA Geociencias por confiar en la propuesta y brindar el apoyo económico necesario. A GeoAmbiente, por las comunicaciones útiles y su participación en este trabajo. A colegas y amigos que participaron con aportes, salidas de campo, materiales y sugerencias. Especialmente a Gonzalo Blanco, Héctor Ferrizo y Leticia Chigliano.

Referencias

- Blanco, G., Rajesh, H. M., Gaucher, C., Germs, G. J. B. y Chemale Jr., F., 2009. Provenance of the Arroyo del Soldado Group (Ediacaran to Cambrian, Uruguay): Implications for the paleogeographic evolution of southwestern Gondwana. En: *Precambrian Res*, 171, pp.57-73.
- Bossi, J. y Navarro, R., 2000. *Recursos minerales del Uruguay*. Montevideo: Ediciones Rojobona.
- Bossi, J. y Gaucher, C., 2004. The Cuchilla Dionisio Terrane, Uruguay: an allochthonous block accreted in the Cambrian to SW-Gondwana. En: *Gondwana Res*, 7(3), pp.661-674.
- Custodio, E. y Llamas, E., 1983. *Hidrología subterránea*. T. 1 y 2. Barcelona: Ediciones Omega.
- Delle Piane, C., Burlini, L., Kunze, K., Brack, P. y Burg, J.P., 2008. Rheology of dolomite: large strain torsion experiments and natural examples. En: *Journal of Structural Geology*, 30, pp.767-776.
- Frei, R., Gaucher, C., Poulton, Døssing, L. N. y Sial, A. N., 2011. Chromium isotopes in carbonates – a tracer for climate change and for reconstructing the redox state of ancient seawater. En: *Earth and Planetary Science Letters*, 312, pp.114-125.
- Gaucher, C., Sprechmann, P. y Shipilov, A., 1996. Upper and middle proterozoic fossiliferous sedimentary sequences of the Nico Pérez Terrane of Uruguay litostratigraphic units, paleontology, depositional environments and correlations. En: *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh*, 199, pp.339-367.
- Gaucher, C., Sprechmann, P. y Montaña, J., 1998. New advances on the geology and paleontology of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado Group of the Nico Pérez Terrane of Uruguay. En: *N. Jb. Geol. Paläont. Mh*, 2, pp.106-118.
- Gaucher, C., 2000. Sedimentology, paleontology and stratigraphy of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay). En: *Beringeria*, 26, pp.1-120.
- Gaucher, C., Boggiani, P.C., Sprechman, P., Sial, A.N. y Fairchild, T.R., 2003. Integrated correlation of the Vendian to Cambrian Arroyo del Soldado and Corumbá Groups (Uruguay and Brazil): palaeogeographic, palaeoclimatic and palaeobiologic implications. En: *Precambrian Res*, 120, pp.241-278.
- Gaucher, C., Chigliano, L. y Pecoits, E., 2004a. Southernmost exposures of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay): Palaeogeographic implications for the amalgamation of W-Gondwana. En: *Gondwana Res*, 7(3), pp.701-714.
- Gaucher, C., Sial, A.N., Blanco, G. y Sprechmann, P., 2004b. Chemostratigraphy of the Lower Arroyo del Soldado Group (Vendian, Uruguay) and palaeoclimatic implications. En: *Gondwana Res*, 7(3), pp.715-730.
- Gaucher, C., Poiré, D.G., Gómez Peral, L. y Chigliano, L., 2005. Litoestratigrafía, bioestratigrafía y correlaciones de las sucesiones sedimentarias del Neoproterozoico – Cámbrico del Cratón del Río de la Plata (Uruguay y Argentina). En: *Latinoamerican Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 12(2), pp.145-160.
- Gaucher, C., Sial, A. N., Ferreira, V. P., Pimentel, M. M., Chigliano, L. y Sprechmann, P., 2007. Chemostratigraphic of the Cerro Victoria Formation (Lower Cambrian, Uruguay): evidence for progressive climate stabilization across the Precambrian - Cambrian boundary. En: *Chemical Geology*, 237, pp. 28 -46.
- Gaucher, C., Sial, A.N., Poiré, D., Gómez-Peral, L., Ferreira, V.P. y Pimentel, M.M., 2009. Chemostratigraphy. Neoproterozoic-Cambrian evolution of the Río de la Plata palaeocontinent. En: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., y Frimmel, H.E., ed., 2009. *Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana. Developments in precambrian geology*. Amsterdam: Elsevier. pp.115 -122.
- Gaucher, C., 2014. Grupo Arroyo del Soldado. En: Bossi, J., Gaucher, C., ed., 2014. *Geología del Uruguay. Tomo 1: Predevónico*. Montevideo: [s.n.]. pp.313-339
- Huizar Álvarez, R. y Oropeza Orozco, O., 1989. Geomorfología karstica de la región de Galena, Estado de Nuevo León. En: *Revista Univ. Nac. Autónoma. México, Inst. Geología*, 8(1), pp.71-83.
- Instituto Uruguayo de Meteorología, [s.d.]. Índice de precipitación estandarizado [En línea]. Montevideo: INUMET. [Consulta: diciembre, 2015]. Disponible en: <http://www.meteorologia.com.uy/ServCli/ipe>.
- Preciozzi, F., Pena, S. y Arrighetti, R., 1988. *Carta geológica del Uruguay, hoja E-18 Puntas del Yermal, Escala 1:100.000. Memoria Explicativa*. Montevideo: Ministerio de Industria y Energía, DINAMIGE.
- Sprechmann, P., Gaucher, C., Blanco, G. y Montaña, J., 2004. Stromatolitic and trace fossil community of the Cerro Victoria Formation, Arroyo del Soldado Group (lowermost Cambrian, Uruguay). En: *Gondwana Res*, 7, pp.753-766.