

CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE LOS ACUÍFEROS FRACTURADOS DEL SUDESTE DE MONTEVIDEO, URUGUAY

PRELIMINARY CHARACTERIZATION OF THE FRACTURED AQUIFERS IN THE SOUTHEAST OF MONTEVIDEO, URUGUAY

CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE AQUÍFEROS FRATURADOS NO SUDESTE DE MONTEVIDÉU, URUGUAI

Karina Pamoukaghlián ⁽¹⁾; Pérez, A ⁽²⁾; Martín Gaye ⁽²⁾, Alejandra Ramos ⁽¹⁾, Javier Draper ⁽³⁾, Marcelo Aboy ⁽³⁾, Jorge Montaña, ⁽⁴⁾

¹ Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas, Iguá 4225, CP 11400. Montevideo. Uruguay.

² División Aguas Subterráneas, Gerencia Agua Potable, O.S.E., Carlos Roxlo 1275, 11200

² División de aguas subterráneas, O.S.E. Carlos Roxlo 1275. 11.200

³ Consorcio Constructor Ferrocarril Central (CCFC). 11600

⁴ Geoambiente, Elias Regules 4684, esquina Abel. 11.500

kpamoukaghlian@fcien.edu.uy & montanox@movinet.com

Recibido: 02/06/21

Aceptado: 23/08/21

Editores: Dra. Elena Peel; MSc. Fernando Scaglia
revista@sociedadgeologiauy.org

PEDECIBA Isidoro de María 1614, piso 6 - Uruguay Tel: 2929 0318-int.
1612/1613 www.sociedadgeologiauy.org

RESUMEN

De acuerdo con las crecientes necesidades de agua potable en la capital de Uruguay, se estudian los Acuíferos Fracturados del Precámbrico en la región sudeste del departamento de Montevideo, con el objetivo de realizar una caracterización hidrogeológica preliminar de los mismos. El área total de Montevideo se dividió en cuatro cuadrantes y de acuerdo a la densidad de perforaciones, seleccionamos el área de trabajo en el cuadrante SE. Se tuvo en cuenta no solaparse en la medida de lo posible con trabajos ya realizados para poder concluir más adelante con un mapa hidrogeológico general de Montevideo. La metodología utilizada fue abordada en base a una extensa recopilación de datos ya existentes, los cuales se digitalizaron conformando en total unas 400 perforaciones. Se seleccionaron las que tenían datos suficientes y necesarios para la caracterización y todo esto fue procesado en Sistemas de Información Geográfica. Geológicamente el área de estudio es muy heterogénea, encontramos principalmente tres tipos de roca principales: esquistos, granito/gneiss y anfibolitas. Se caracterizaron estos tres tipos preliminarmente de acuerdo con la capacidad de fractura. La prospección en el área de estudio se dificulta debido a que hay diferentes rocas, con diferentes tipos y capacidad de fractura. Los clásicos diagramas de rosas de vientos dan esencialmente fracturas NE asociadas a caudales elevados, pero si dividimos el área en 3 subáreas tenemos otras diferencias en las direcciones, longitud

de fractura y caudales asociados. Esto sumado al tipo de roca nos permite inferir que la mejor zona para prospectar agua en la zona señalada sería en la interconexión de las direcciones de fractura NS o NNE y la típica NE, paralela ésta última al borde tectónico inferior de la cuenca Santa Lucía.

Palabras claves: acuífero fisurado, precámbrico, capacidad de fractura, fractura portadora de agua.

ABSTRACT

Based on the growing need for drinking water in the capital of Uruguay, the Fractured Precambrian Aquifers in the southeast region of the department of Montevideo are studied, with the aim of carrying out a preliminary hydrogeological characterization. The total area of Montevideo was divided into four quadrants and, on the basis of perforation density, we were able to select the work area in the SE quadrant. It was taken into account not to overlap as far as possible with previous works, in order to contribute to a future, general hydrogeological map of Montevideo. The methodology used was based on an extensive collection of existing data, which was digitized, comprising a total of nearly 400 drillings. We selected the items that contained sufficient data for characterization, and everything was processed on Geographic Information Systems. The study area's geology is very heterogeneous, we found three main rock types: schists, granite/gneiss, and amphibolites. These three types were preliminarily characterized based on fracture capacity. Prospection is difficult in the study area because of the presence of different rocks, with different fractures and fracture capacities. Classic rose diagrams show mainly NE fractures associated with high flows, but if we divide the area into three parts, other fracture directions, fracture lengths, and associated flows emerge. This factor and the rock type study allow us to infer that the best area to prospect water in the study zone would be the interconnection between N-S or NNE and the typical NE fracture directions, the latter being parallel to the inferior tectonic border of the Santa Lucia Basin.

Keywords: fissured aquifer, precambrian, fracture capacity, water-bearing fracture.

RESUMO

Atendendo às crescentes necessidades de água potável na capital uruguaia, estudam-se os Aquíferos Fraturados Pré-cambrianos na região sudeste do departamento de Montevideu, com o objetivo de realizar uma caracterização hidrogeológica preliminar dos mesmos. A área total de Montevideu foi dividida em quatro

quadrantes e de acordo com a densidade de perfuração, selecionamos a área de trabalho no quadrante SE. Levou-se em consideração que não se sobrepôs na medida do possível com os trabalhos já realizados para posteriormente se concluir com um mapa hidrogeológico geral de Montevideu. A metodologia utilizada foi abordada a partir de um extenso acervo de dados existentes, que foram digitalizados, totalizando 400 perfurações. Foram selecionados aqueles com dados suficientes e necessários para a caracterização e tudo foi processado em Sistemas de Informações Geográficas. Geologicamente, a área de estudo é muito heterogênea, encontramos principalmente três tipos principais de rocha: xistos, granitos/gnaisses e anfibolitos. Esses três tipos foram caracterizados preliminarmente de acordo com sua capacidade de fratura. A prospecção na área de estudo é difícil porque existem diferentes rochas, com diferentes tipos e capacidades de fratura. Os diagramas de rosa dos ventos clássicos fornecem essencialmente fraturas NE associadas a altas taxas de fluxo, mas se dividirmos a área em 3 subáreas teremos outras diferenças nas direções, comprimento da fratura e taxas de fluxo associadas. Isso somado ao tipo de rocha permite inferir que a melhor área para prospecção de água na área indicada estaria na interligação das direções de fratura NS ou NNE e a típica NE, esta última paralela à borda tectônica inferior da Bacia do Santa Lucía.

Palavras-chave: aquífero fissurado, pré-cambriano, capacidade de fratura, fratura portadora de água.

INTRODUCCIÓN

El cuadrante sudeste del Departamento de Montevideo fue seleccionado como área de estudio, teniendo en cuenta los datos hidrogeológicos disponibles (Figura 1) (de acuerdo con información de datos públicos de DINAMIGE; tesis doctoral de J. Montaña (1999); datos de Proyecto PRENADER y algunos datos privados).

Dada la actual situación de abastecimiento de la ciudad de Montevideo con agua superficial y de acuerdo con el crecimiento demográfico, se debería planificar recurrir en algún momento a las fuentes hídricas subterráneas, con el fin de obtener volúmenes de agua suficientes y de calidad apropiada. Si bien existen estudios en gran parte del departamento (Montaña *et al.* 1999; Montaña *et al.* 2002; 2003), es necesario completar la caracterización de los acuíferos fracturados correspondientes al basamento cristalino que conforma el subsuelo de la ciudad y la zona suburbana en el área seleccionada, la cual abarca parte de la zona urbana no explorada aún desde un punto de vista hidrogeológico y científico.

OBJETIVOS

Se tiene como principal objetivo realizar una caracterización preliminar, de acuerdo a los datos disponibles de DINAMIGE (Visualizador online y muestras de *cutting*); PRENADER (Proyecto Facultad de Ciencias) y datos reservados de GEOAMBIENTES del Cinturón Pando. Se contó con el asesoramiento de la Administración de las Obras Sanitarias del Estado (O.S.E). Como objetivo específico se planteó generar una base de datos procesados en *QGIS free software*; y teniendo en cuenta las direcciones de fracturas principales, preliminarmente en 2D, recomendar los mejores lugares para una posible prospección.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca el cuadrante sudeste de Montevideo (Figuras 1 y 2), teniendo en cuenta la densidad de perforaciones, que incluye datos de la Cuenca Arroyo Carrasco (Montaño *et al.* 1999), la Cuenca Arroyo Toledo (Pérez A., 1993) y que toda la parte oeste-sudoeste está cubierta por datos del PROYECTO PUNTA ESPINILLO – Facultad de Ciencias-PRENADER (Montano *et al.*, 2002).



FIGURA 1. Localización del área de estudio en Uruguay.
FIGURE 1. Localization of the study area in Uruguay.

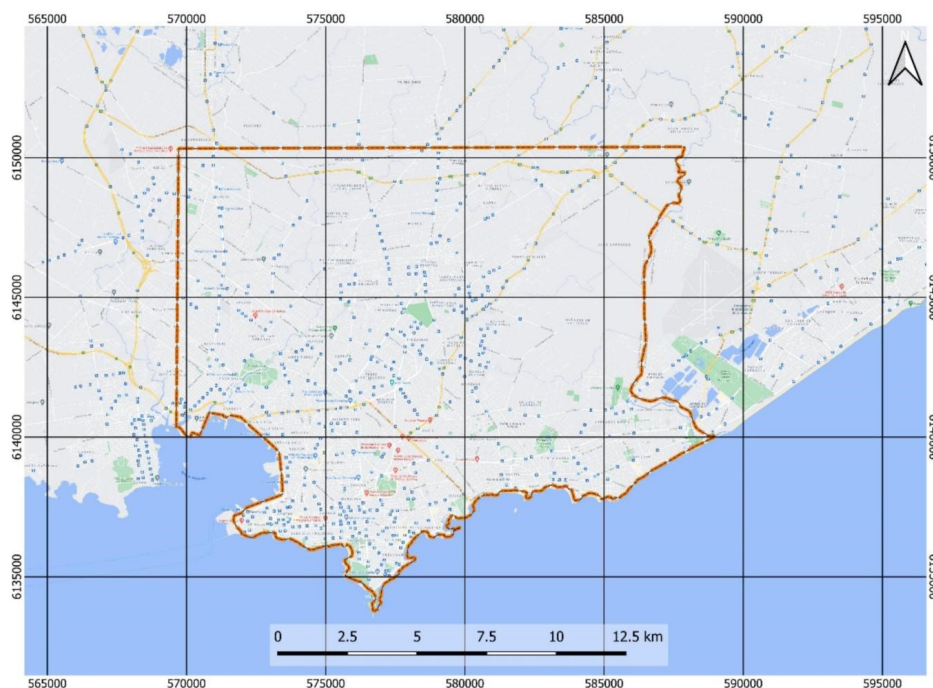


FIGURA 2. Área de estudio con localización precisa.

FIGURE 2. Study area with accurate localization.

METODOLOGÍA

Para la concreción de los objetivos propuestos, siguiendo el esquema de prospección de Custodio (1983), con las actualizaciones pertinentes y aplicando las nuevas herramientas de *software* disponibles, se planteó la realización de las siguientes actividades:

Revisión bibliográfica sobre geología e hidrogeología y de antecedentes históricos documentados especialmente sobre hidrogeología para la confección de un inventario de pozos y conteniendo información que incluya mapas geológicos, hidrogeológicos, piezométricos, etc.

Elaboración de un INVENTARIO DE POZOS DEL DEPARTAMENTO DE MONTEVIDEO.

Fotogeología en base a fotointerpretación e imágenes satelitales, considerando Modelo Digital del Terreno e imágenes de nubes de puntos procesadas con *software LAS Tools* para *QGIS*, con la superposición de mapas geológicos, geo-estructurales, mapas de fracturas, y a su vez solapados con perforaciones georreferenciadas con datos hidráulicos.

Elaboración de un mapa con subzonas con geología y características particulares de la capacidad de fractura; asignándole una caracterización hidrogeológica que reflejará la productividad de cada subzona y una recomendación preliminar de prospección de agua subterránea.

GEOLOGÍA

Se utilizó como base cartográfica el mapa geológico 1:50.000 del Departamento de Montevideo, de Spoturno y Oyhantcabal (2004) (Figura 3) y las fotografías aéreas (1:20.000 y 1:40.000 de toda la zona). La geología del área, la cual es bastante compleja, se describe a continuación.

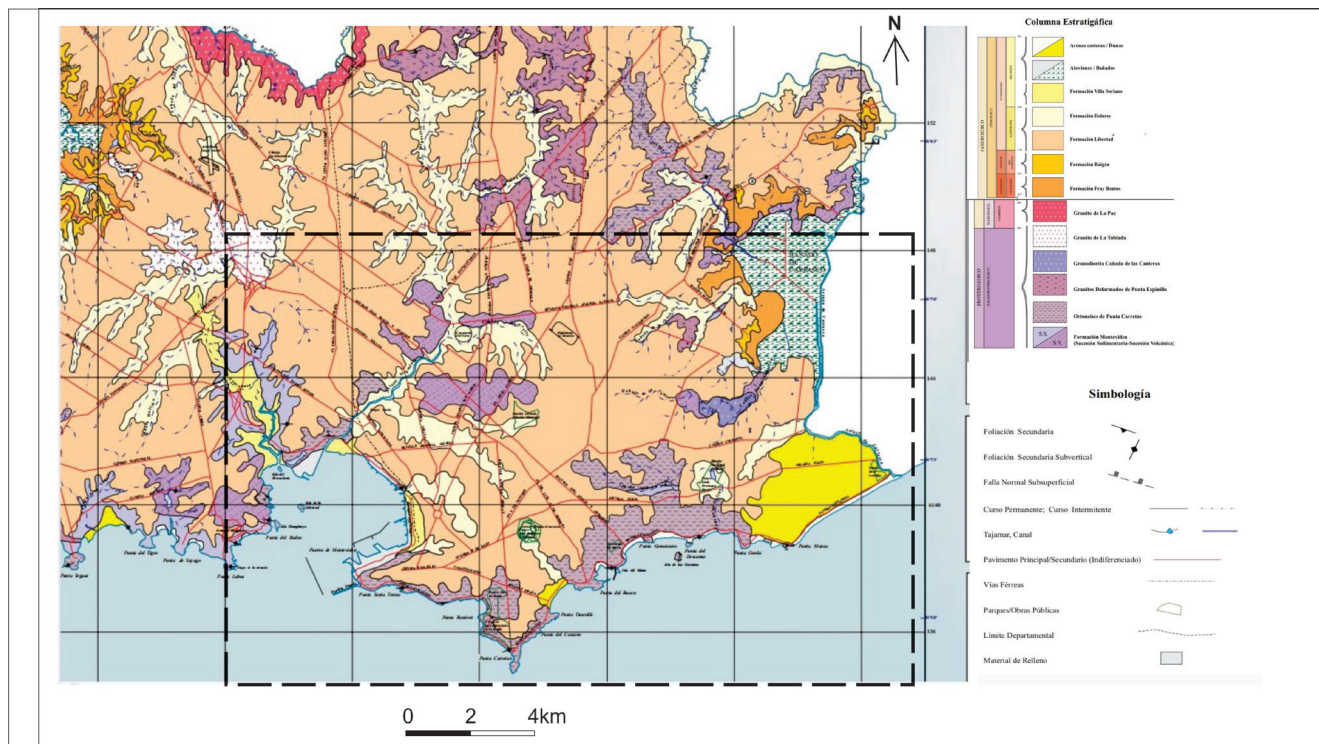


FIGURA 3. Mapa geológico, abarcando la zona de estudio (modificado de Spoturno & Oyantcabal, 2004).

FIGURE 3. Geologic map, in the study zone (modified from Spoturno & Oyhantcabal, 2004).

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

El Terreno Tandilia ha sido definido por Bossi *et al.* (2005) y aún está en discusión la aceptación del mismo como un terreno tectono-estratigráfico diferente. La parte occidental del Cratón del Río de la Plata fue por mucho tiempo considerada un bloque particular: Terreno Piedra Alta según Bossi *et al.* (1993) con el descubrimiento de la Zona de Cizalla Colonia (Ribot *et al.*, 2005; Cingolani, 2009; Gianotti, 2009), la cual está compuesta por una faja ultramilonítica de espesor >5 km, se planteó la primera evidencia de que este bloque no era homogéneo. La porción al sur de la Zona de cizalla Colonia se separó como un terreno tectonoestratigráfico diferente, denominado Terreno Tandilia (Ribot *et al.*, 2005; Pamoukaghlian *et al.*, 2017), de acuerdo con las siguientes evidencias (según Bossi & Cingolani, 2009; Abre *et al.*, 2014): (a) Este Terreno está representado por el Cinturón Pando (Bossi *et al.*, 1998), con desarrollo regional ENE, el cual forma parte del basamento de la fosa tectónica de Santa Lucía. Está compuesto por la Formación Montevideo (secuencia volcano-sedimentaria de edad

Paleoproterozoico) y abundantes intrusiones de granitos, pegmatitas, aplitas y lamprófidos. La Fm. Montevideo está limitada al norte por la Fm. Mosquitos y es intuida hacia el este por un importante cuerpo granítico denominado Granito de Soca. Esta unidad se desarrolla en los departamentos de Montevideo y Canelones con una dirección general E-W. Fue definida originalmente por Bossi (1975), incluyendo una asociación de gneisesoligoclásica dos micas, orto y para-anfibolitas y paragneissesgrafitosos. Como lo menciona Abre *et al.* (2014), la monografía de Walther (1927, 1948) describe exhaustivamente estas litologías. Abre *et al.* (2014) recopilan información sobre las diversas litologías de la Fm. Montevideo. Describen las cuarcitas micáceas de la Fm. Montevideo, que se desarrollan próximas a la localidad de Joaquín Suárez y la Ciudad de Pando. Presentan una textura granoblástica característica, estando constituidas desde el punto de vista mineralógico por cuarzo y muscovita y a veces presentan textura granolepidoblastica, desarrollando bandas de sericita-muscovita. El granito de Soca es un granito que presenta diferentes facies, muchas veces rapakivi compuesto por cuarzo, feldespato redondeado (textura wiborgítica), anfíboles y biotita. Su edad es 2.056 ± 11 Ma de acuerdo con dataciones U-Pb SHRIMP de Hartmann *et al.* (2001).

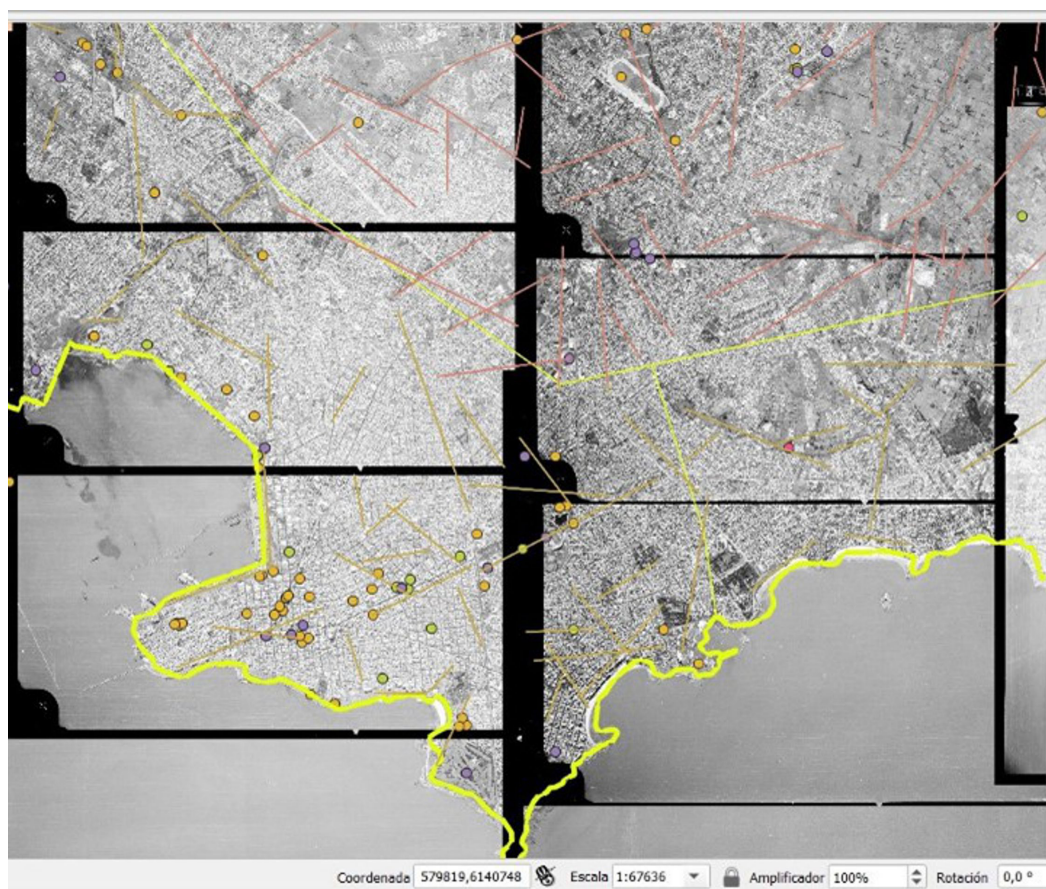


FIGURA 4. Metodología de fotointerpretación en imágenes fotocromáticas, escala 1:20.000, trasladada a QGIS a fotos aéreas escala 1:40.000 con su digitalización topológica de fracturas.

FIGURE 4. Methodology for the photointerpretation of monochromatic aerial photos, 1:20.000 scale, seen in QGIS, with topologic fracture digitalization.

ANTECEDENTES SOBRE GEOLOGÍA DEL DEPARTAMENTO DE MONTEVIDEO. CUADRANTE SE

En el área de estudio se estudiarán las rocas que componen el sistema acuífero fisurado. Las mismas se encuentran en las siguientes unidades geológicas que conforman el Cinturón Pando: la Formación Montevideo e intrusiones graníticas asociadas. Litológicamente la Fm. Montevideo corresponde principalmente a cuarcitas, paragneiss, micaesquistos y ortoanfibolitas. También se encuentran ortogneis graníticos y granitos deformados. Los intrusivos asociados, dentro del departamento de Montevideo son el Granito de Soca y el Granito Sosa Díaz. El granito La Tuna aflora en Canelones. Finalmente se reconoce el granito La Paz como intrusivo neoproterozoico.

De acuerdo con el mapa geológico a escala 1:50.000 de Spoturno & Oyhantcabal (2004) (Figura 3) afloran en el área de estudio, correspondiente al sector sudeste de Montevideo, las siguientes unidades geológicas precámbricas (Paleoproterozoico): (1) Formación Montevideo: definida como una secuencia volcano-sedimentaria con metamorfismo a facies anfibolita (Oyhantcabal., 2002, 2003). Está compuesta por: (a) ortoanfibolitas de color verde muy oscuro, de granito fino, tenaces y con esquistosidad de desarrollo variable, y con estructuras tipo pillow lavas; (b) micaesquistos, de textura lepidoblástica, compuestos por cuarzo, muscovita, opacos, turmalina y ocasionalmente grandes cristales de andalucita, con exposiciones en los alrededores de la Cañada de las Canteras (Spoturno & Oyhantcabal, 2004; (c) paragneis intercalados con micaesquistos y para-anfibolitas, biotíticosanfibólicos y biotítico-muscovíticos; (e) para-anfibolitas de textura nematoblástica, compuesta por anfíboles, augita-aegirina, plagioclasa, cuarzo, epidoto, biotita, opacos y apatito; preservan la estratificación original y desarrollan pliegues isoclinales. (2) Ortogneis de Punta Carretas principalmente en la faja costera, con exposiciones en las puntas rocosas. Son rocas de grano fino a medio, de color gris, tenaces, de textura lepidoblástica. (3) Granitoides deformados de Punta Espinillo (con afloramientos al norte del área de estudio). Las facies predominantes son: (i) granitos de grano medio, biotíticoequigranular a porfiroide y (ii) granito de grano medio con biotita, muscovita y granate, y diques de pegmatita con abundante granate. Presentan una foliación protomilonítica con direcciones predominantes N80E/60S, E-W, N70W/63S y N80W. (4) Granodiorita de Cañada de las Canteras: roca granítica de grano fino a medio, con biotita, con textura lepidoblástica. Se observan exposiciones en la zona del curso medio inferior de la Cañada de las Canteras.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Spoturno y Oyhantcabal (2004) señalan 3 fases de deformación dúctil: (1) La primera fase de deformación (F1) corresponde a pliegues isoclinales en la secuencia volcano-sedimentaria (Fm. Montevideo) que generan repetición de estratos en las anfibolitas y los micaesquistos. (2) La segunda fase de deformación (F2) genera foliación S2, recrystalizando los granitos en ortogneiss, con rumbos entre N70E y N70W. (3) La tercera fase de deformación (F3) corresponde a pliegues abiertos y cerrados que afectan la foliación de esquistos y ortogneiss; y a la foliación protomilonítica de los granitos deformados. Montaña (1999) explica que el evento orogénico Transamazónico que afecta la Fm. Montevideo genera deformaciones en régimen dúctil-ruptil, evidenciado por lineaciones y superficies de esquistosidad en los gneises, anfibolitas y micaesquistos y por micropliegues observados principalmente en las anfibolitas. La dirección principal de estas fracturas varía entre N5-10E y E-W, con buzamientos verticales a subverticales (80° S y excepcionalmente 45° a 50° S), con ejes de micropliegues en general horizontales. Cardelino *et al.* (1969) estima que la deformación rúptil de este evento está representada por las estructuras de dirección N30-40W, ocupadas por filones pegmatíticos, hecho observado también por Montaña (1999). Esto implica una fase distensiva hacia el final del origen en régimen dúctil-ruptil, puesto que algunos de estos filones generan pliegues y formas irregulares.



FIGURA 5. Superposición del mapa geológico, parcial, donde se puede observar un efecto 3D (tridimensional) con el relieve superpuesto, donde las fallas fotointerpretadas se corresponden con la topografía del MDT (Modelo Digital del Terreno).

FIGURE 5. Onlapping of the geological map, where partially we can observe a 3D (three-dimensional) effect with the overlapped relief, where the fotointerpretation of faults are corresponding with the topography DTM (Digital Terrain Model).

La fracturación de dirección N40-50E está muy desarrollada y coincide con el eje principal de la Fosa Santa Lucía (Cretácico), según observaciones de Montañó *et al.* (2002) y de este trabajo (ver Figuras 4 y 5). Estos autores también observan estructuras conjugadas y subsidiarias, las cuales constituyen sectores de gran importancia hidrogeológica. Según estos autores las direcciones de fractura más frecuentes son: (1) N400-50E, de longitudes entre 500 y 1000 m: direcciones N40-50 W y longitudes entre 400 y 800m. De acuerdo con Montañó (1999) “estas 2 lineaciones principales normales entre sí, son las portadoras de agua (fracturas abiertas) y son las más frecuentes en la zona central y norte de la cuenca”, refiriéndose a la Cuenca del Arroyo Carrasco, al este del Departamento de Montevideo. El mismo autor señala que existen además ‘fracturas horizontales’ no detectables en foto aérea, que tienen posición horizontal o sub-horizontal y derivan de la descompresión de las rocas del basamento por disminución de la presión litostática debido a la erosión de su cobertura. Se pueden observar en algunas canteras y tienen una gran importancia hidrogeológica cuando reciben aporte de otras fracturas verticales o sub-verticales.

COBERTURA CENOZOICA

Estas rocas paleoproterozoicas están frecuentemente cubiertas por formaciones sedimentarias cenozoicas, aunque en general son de poco espesor. Se reconocen de base a tope, de acuerdo con Spoturno & Oyhanncabal (2004) y según la definición original de (1), (2) y (3) de Goso (1965): (1) Formación Fray Bentos (OLIGOCENO-PLEISTOCENO): depósitos bien seleccionados, limosos y/o areniscosas, con porcentajes variables de arena fina a muy fina, a veces arcillosas, masivas y con presencia de carbonato de calcio de forma concrecional. En la base desarrolla niveles lodolíticos, fangolíticos y brechoides y su origen es continental peridesértico. (2) Formación Raigón (MIOCENO SUPERIOR-PLIOCENO): areniscas finas a conglomerádicas, mal seleccionadas, con estratificación cruzada y paralela, de color blanco amarillento, con lentes y/o niveles de arcillas verdes y conglomerados, su origen es de sedimentación fluvial a fluviodeltaíca. (3) Formación Libertad (PLEISTOCENO MEDIO): sedimentos de origen continental en zona peridesértica, correspondiente a lodolitas masivas, secundariamente loess y fangolitas con porcentaje variables de arenas, arcillas, y gravillas, de color pardo a pardo rojizo. Presentan carbonato de calcio, así como pequeñas concreciones de óxido de hierro y rosetas de yeso. (4) Formación Dolores (PLEISTOCENO SUPERIOR): Definida por Goso *et al.* (1972), corresponde a depósitos masivos, pardos y con tonalidades grises, con un grado de compactación variable de materiales limo arcillosos y limo arenosos, con contenidos variables de arena y gravilla. Presenta carbonato

de calcio disperso concrecional. Son de origen continental, relacionado a fenómenos eólicos y de coluviación, con formación de flujos de barro.

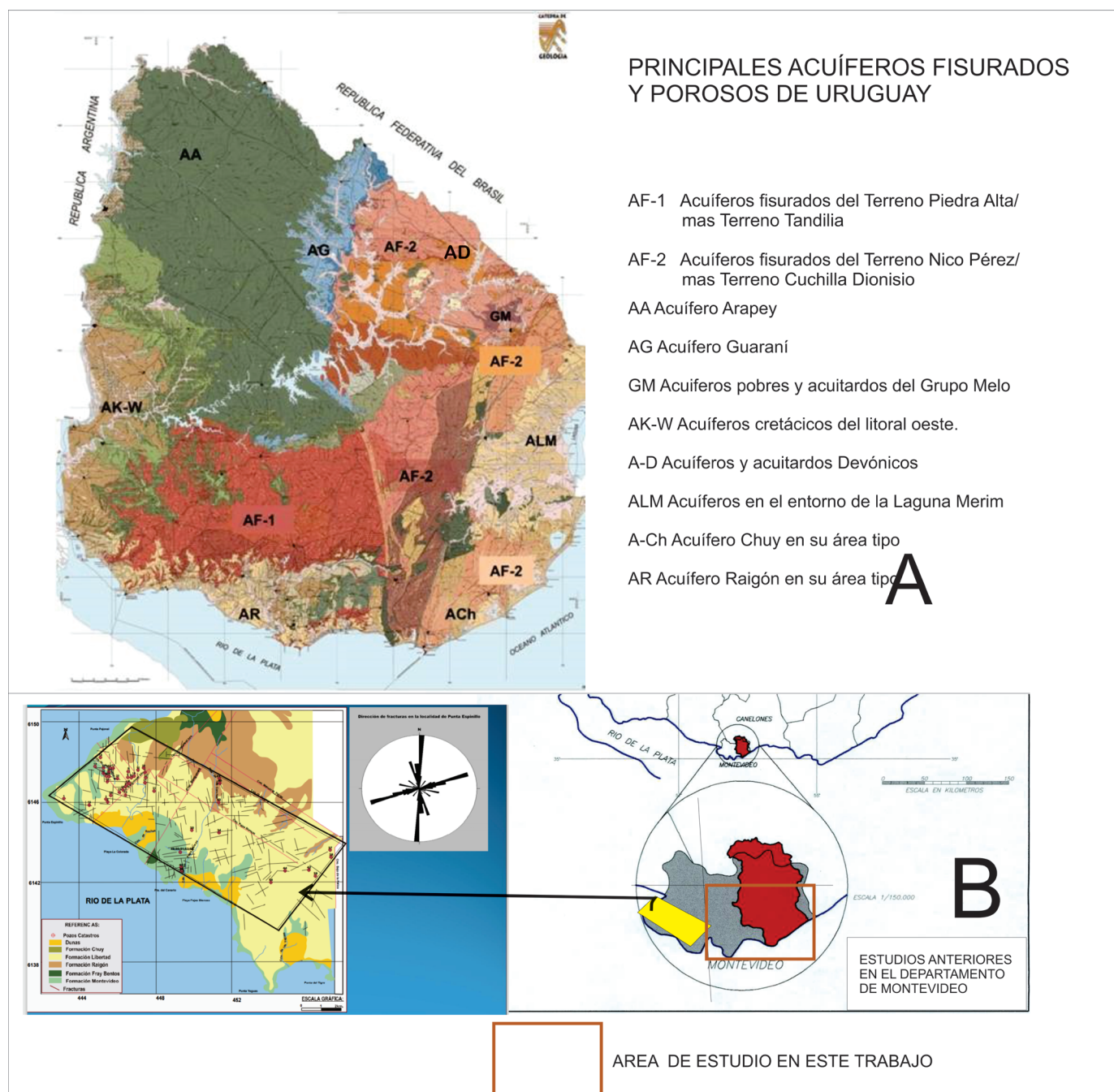


FIGURA 6. Estudios anteriores en el Departamento de Montevideo, en contraste con el área de estudio: (A) Principales acuíferos porosos y fisurados de Uruguay, con mapa geológico base tomado de Bossi *et al.* (1998). (B) Acuíferos fracturados del departamento de Montevideo en áreas ya estudiadas.

FIGURE 6. Preliminary studies in Montevideo Department, compared with the study area. (A) Fractures and sedimentary aquifers of Uruguay. (B) Fractured aquifers in Montevideo Department already study areas.

TABLA 1. Caracterización hidrogeológica del basamento precámbrico (tomado de Montañó, 1999).

Carac- terización \ Roca	Gneises	Paranfíbolitas	Micaesquistos
1) Apertura de fractura			
3) Rellenos de fracturas			
2) Meteorización			
4) Circulación y almacenamiento de agua			
5) Caracterización hidrogeológica	Acuífero bueno	Acuífero regular	Acuitardo

HIDROGEOLOGÍA

Una vez descripta la geología, base inherente para el estudio hidrogeológico, nos abocaremos a la interpretación de la hidrogeología. La base de los antecedentes se muestra en la Figura 6 y en la tabla 1, desarrollándose a continuación.

Montañó (1999) en su estudio de caracterización del sistema hidrogeológico de la Cuenca del Arroyo Carrasco, realiza una clasificación hidrogeológica del basamento cristalino (Tabla 1), la cual es aplicable a la zona de estudio. El criterio de clasificación es principalmente la porosidad de fractura, conjuntamente con el tipo de fractura y sus interconexiones para determinar la capacidad de almacenamiento de fractura, o lo que se denomina “capacidad de fractura” (Montañó, 2013).

Se pueden reconocer tres unidades hidrogeológicas de acuerdo con la litología y capacidad de fractura y teniendo en cuenta la clasificación de Montañó (1999): (1) Acuíferos fracturados donde predominan las anfíbolitas, generalmente buenos acuíferos si no están alteradas. (2) Acuíferos fracturados donde predominan los micaesquistos, que difícilmente no presentan fracturas rellenas, y por lo tanto difícilmente presentan buena acumulación y circulación de agua. (3) Granitos y Gneiss, los cuales son en general los que presentan mejor capacidad de fractura.

Los contactos tectónicos entre ellos son los que podemos señalar como las mejores fracturas dentro del Acuífero Fracturado del Cinturón Pando.

Los sedimentos cuaternarios arriba descritos hacen las veces de área de recarga. El principal acuífero poroso que funciona como recarga es el Acuífero Raigón, aunque generalmente tiene poca expresión en la zona, es

TABLA 2. Cuadro estratigráfico utilizado en este artículo, modificado de Spoturno *et al.* 2004 con consideraciones de Bossi y Gaucher (2014).

TABLE 2. Stratigraphic chart used in this article, modified from Spoturno *et al.* 2004., considering Bossi and Gaucher (2014).

EDAD	UNIDAD LITOLÓGICA	
CÁMBRICO	Granito La Paz	
PALEOPROTEROZOICO	Granito La Tablada Granodiorita Cda. Las Canteras Granitoides deformados de Punta Espinillo	PANDO CINTURÓN
	Ortogneiss de Punta Carretas	
	Fm. Montevideo (sucesión metavulcanosedimentaria)	

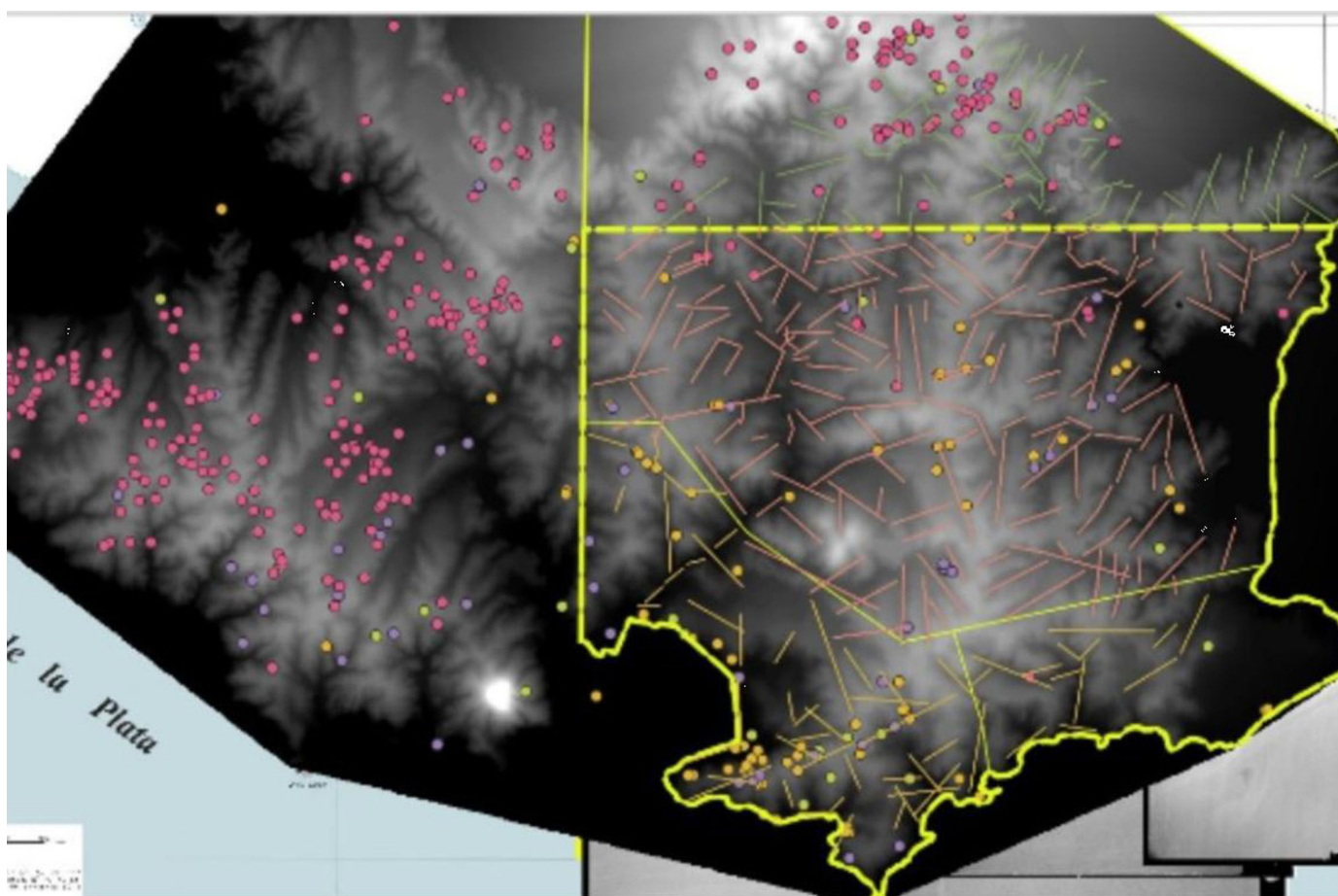


FIGURA 7. Superposición de mapa cartográfico con el Modelo Digital del Terreno (MDT) en QGIS software.

FIGURE 7. Overlapping of the geologic map with Digital terrain model (DTM) in QGIS software.

una unidad hidrogeológica fundamental para amortiguar la contaminación y para establecer zonas de recarga eficientes. Muchas veces sobre yacido por el Acuífero Libertad, también de muy poco espesor en la zona, representa la misma función de amortiguador, pero a su vez al confinar al Acuífero Raigón lo oblitera, le hace reducir la infiltración hacia el acuífero fisurado.

RESULTADOS

La superposición de los fotolineamientos interpretados de las fotos aéreas y otras imágenes, se superponen con el Modelo Digital del Terreno, viendo como el solape es muy coincidente (Figura 7). Esto podría implicar un método efectivo en zonas de este tipo, es decir donde las discontinuidades y las heterogeneidades del acuífero se dan por el fracturamiento tectónico del basamento ígneo-metamórfico. Difiere de zonas volcánicas, por ejemplo, donde debería estudiarse si esta superposición es tal.

Se identificación de las diferentes subzonas dentro del Sistema Acuífero Fracturado en función de la litología y características de las fracturas.

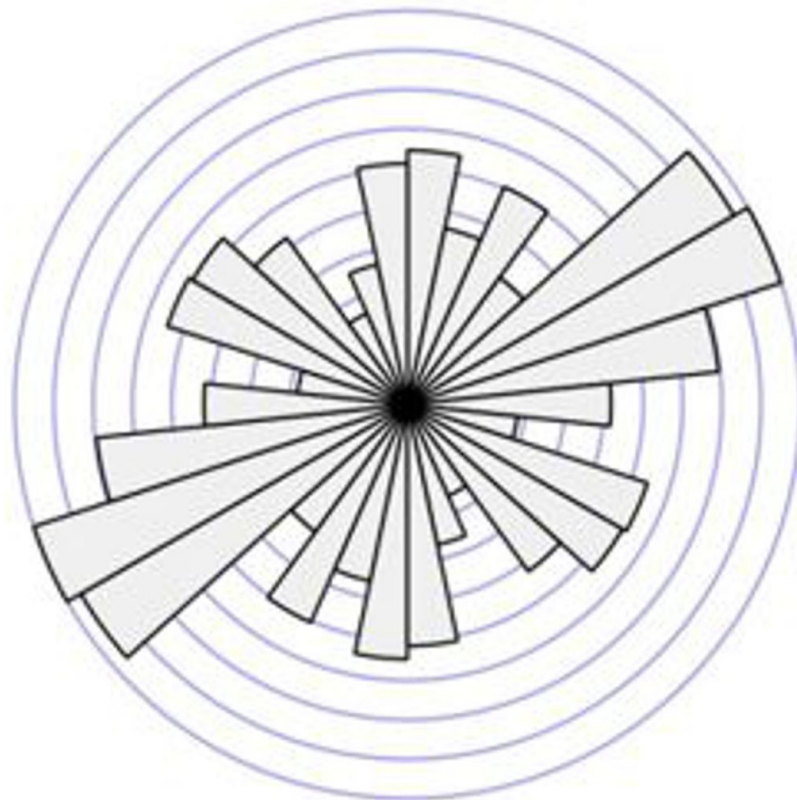


FIGURA 8. Rosa de los vientos de distribución de las direcciones de fracturas para toda el área de estudio.

FIGURE 8. Rose diagram for the fracture direction distribution of the whole study area.

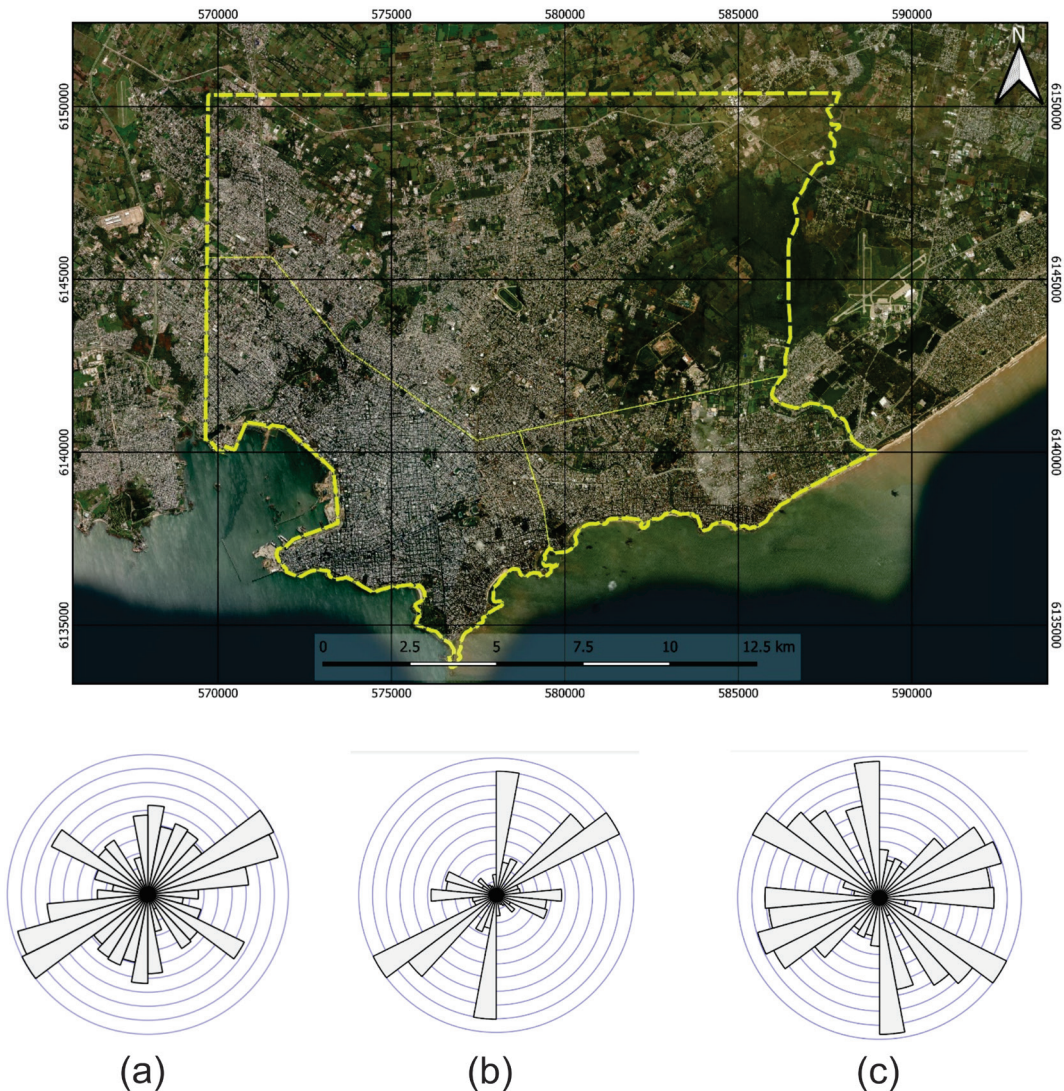


FIGURA 9. Interpretación geológica preliminar de cada subzona: (a) subzona norte, (b) subzona sureste y (c) subzona suroeste.

FIGURE 9. Preliminary hydrogeologic interpretation of each subzone: (a) North subzone, (b) Southeast subzone and (c) Southwest subzone.

Se pueden separar a priori dos zonas hidrogeológicas (Figura 9): (a) zona donde afloran las rocas paleoproterozoicas y por lo tanto el acuífero fisurado no está confinado; (b) zonas donde el acuífero fisurado conformado por las rocas del basamento paleoproterozoico está confinado por las formaciones sedimentarias cenozoicas.

Las diferentes litologías identificadas en los perfiles de las perforaciones se clasifican hidrogeológicamente de acuerdo con los criterios propuestos por Montaño (1998). En el presente trabajo se asignarán clases hidrogeológicas a las diferentes sucesiones lito estratigráficas observadas, teniendo en cuenta además las características de las fracturas, su densidad e interconexión. Se puede ver la rosa de vientos correspondiente a todas las fracturas identificadas en la zona en la figura 8. Se identificaron en este trabajo 3 subzonas: (a) Subzona norte; (b) Subzona sureste y (c) Subzona suroeste.

Los pozos se localizaron en un mapa geológico, utilizando QGIS 3.10 open access *software*. La fotointerpretación fue comparada con un Modelo Digital del Terreno (MDT) para determinar la orientación de las fracturas principales se utilizaron diagramas de rosas de los vientos (Figuras 8 y 9) y la misma fue correlacionada con la información de los pozos. En esta etapa preliminar, datos de caudales se ponderaron para identificar cuáles son las fracturas abiertas.

El área principal fue dividida en 4 sectores como subáreas, de acuerdo con la densidad de fracturas y con la densidad de perforaciones en Punta Espinillo. De acuerdo con la densidad de pozos (aproximadamente 3 pozos/ km²) y la densidad de información disponible, fueron seleccionadas las perforaciones con información más completa y se identificaron los siguientes resultados preliminares analíticos, para todo el cuadrante SE de Montevideo (Figura 8): (a) fracturas portadoras de dirección N 40-60, de hasta 3000 m de longitud y con valores de caudales entre 3 y 25 m³ /h, promedio de 6 m³ /h, (b) fracturas portadoras de dirección N 40-50W, relacionadas también con caudales elevados (3 a 14 m³ /h, media del orden de 8m³ /h) , (c) dos fracturas subsidiarias con direcciones N-S y E-W, con un número pequeño de pozos asociados (caudales entre 1 y 7 m³ /h).

DISCUSIÓN

En el área sudeste, dos direcciones ortogonales de fracturas principales fueron descritas: (1) N 40-N50 E con fracturas entre 500 y 1000 metros de largo, (2) N 40-50 W con fracturas entre 400 y 800 m. Este comportamiento fue verificado con menores variaciones para toda el área y coincidente con los resultados obtenidos en el área de Arroyo Carrasco, de Montañó *et al.* (1998), coincidentes con los recientes datos del Trabajo Final de grado de Irene Balado (CTAguá, 2020, inédito) en el Arroyo de las Canteras. También coincide con el trabajo final de Hidrogeología de Andrés Matteauda (inédito), quien ensayó la fracturación en la Cuenca del Arroyo Toledo.

Sin embargo, aparentemente hay una diferente capacidad de fractura para las diferentes subáreas, lo cual sugiere que las subáreas SW y SE podrían tener un mayor potencial hidrogeológico. También influye en esto la mayor densidad de perforaciones en el área metropolitana de la subárea suroeste, los cuales se comportan como conectores hidráulicos que hacen mayor la capacidad de las fracturas, y por lo tanto la acumulación y circulación de agua. fracturas cortan el granito y no los micaesquistos, los cuales la mayoría de las veces presentan relleno de arcilla en las fracturas, por la frecuente de arcillas por meteorización de los filosilicatos.

Para la prospección de agua subterránea, la recomendación preliminar es la de perforar en lugares donde se interconecten las fracturas SW y SE, preferentemente en las áreas donde se haya comprobado la geología

para tener mayor certeza de que no se encontrarán fracturas rellenas, sino fracturas abiertas.

CONCLUSIONES

Este trabajo cumplió con el objetivo de realizar una caracterización hidrogeológica preliminar del acuífero fracturado, basado en datos de campo precedentes.

Se logró probar una gran coincidencia entre la fotointerpretación para este tipo de acuífero, y el Modelo Digital del Terreno (MDT) desarrollado en QGIS free open *software* en base al mapa de curvas de nivel. Esto no es menor ya que nos da paso a una herramienta muy útil como complemento de la fotointerpretación.

Cuatro zonas fueron separadas e identificadas aleatoriamente para luego estudiar la zona sureste de Montevideo, donde se logró caracterizar las fracturas abiertas y su predominio. Como se ha mencionado en la discusión, la mayoría de las fracturas abiertas (que presentan caudales elevados a muy elevados) se encuentran en dirección SW-NE, coincidente con el labio inferior de la fosa tectónica de SANTA LUCÍA.

En una caracterización más detallada se debería hacer un modelo 3D con las profundidades de aportes principales. Además, se deberían actualizar los datos, aunque la litología no presentaría variabilidad, pero si el acomodamiento de los estratos, y las posibles fisuras nuevas, aunque esto es muy discutible. Se necesitará caracterizar tipo de fractura para realmente concluir capacidad de fractura (*sensu* Montaña *et al.* 1998).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRE, P., BOSSI, J. A., CINGOLANI, C. A., GAUCHER, C., PIÑEYRO, D. et al.; El terreno Tandilia en Uruguay y Argentina. Universidad de la República; 1; 2014; 89-119.
- BOSSI, J., FERRANDO, L., MONTAÑA, J., CAMPAL, N., MORALES, N., GANCIO, F., SCHIPILOV, A., PIÑEIRO, P., SPRECHMAN, P. (1998) Carta geológica del Uruguay 1/500.000.
- BOSSI, J., FERRANDO, L., MONTAÑA, J., CAMPAL, N., MORALES, H., GANCIO, F., SCHIPILOV, A., PIÑEIRO, D. & SPRECHMANN, P. (1998). Carta Geológica del Uruguay a escala 1:50.000. Ed. Facultad de Agronomía en CD-ROM.
- BOSSI, J., FERRANDO, L. A., FERNÁNDEZ, A., ELIZALDE, G., MORALES, H., LEDESMA, J., CARABALLO, E., MEDINA, E., FORD, I. & MONTAÑO, J. (1975). Carta Geológica del Uruguay. Escala 1/1.000.000. Editada por los Autores. Montevideo, Uruguay.
- BOSSI, J., ORTIZ, A. & PEREA, D. (2009). Pliocene to MiddlePleistocene in Uruguay: A model of climateevolution. Quaternary International. ...210: 37

- BOSSI, G.E., MURUAGA, C.M., SANAGUA, J.G., HERNANDO, A., & AHUMADA, A. (1993). Geología y estratigrafía de la cuenca Neógena Santa María-Hualfín (Departamentos Santa María y Belén, Provincia de Catamarca). Congreso Geológico Argentino, No. 12, Actas 2: 156-165. Mendoza.
- CINGOLIANI, C. (2009). Extension and general evolution of the Río de la Plata Craton. In: Gaucher, C., Sial, A.N., Halverson, G.P., Frimmel, H.E. (Eds.): Neoproterozoic-Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana. *Developments in Precambrian Geology*, 16, Elsevier, 73-85.
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, E. (1983) Hidrogeología subterránea. Tomo 1 y 2. Editorial Omega. España.
- MONTAÑO, X. J. (1998). Caracterización y vulnerabilidad de sistemas hidrogeológicos discontinuos. Cuenca del Arroyo Carrasco. Montevideo-Uruguay. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. 147 pp.
- FILI, M., DA ROSA FILHO, E.F., AUGÉ, M., MONTAÑO XAVIER, J. Y TUJCHNEIDER, O., 1998. El Acuífero Guaraní. Un recurso compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (América del Sur). Instituto Tecnológico Geominero de España. *Boletín Geológico y Minero* 109(4): 389-394.
- GOSO, H. (1972). ??
- HARTMANN, L.A., CAMPAL, N., SANTOS, J.O., MCNEUGHTON, N.J., SCHIPILOV, A., & LAFON, J.M. (2001). Archean crust in the Rio de la Plata Craton, Uruguay – SHRIMP U-Pb zircon reconnaissance geochronology. *Journal of South American Earth Science*, 14: 557 -570
- MONTAÑO, X. J. (1998). Caracterización y vulnerabilidad de sistemas hidrogeológicos discontinuos. Cuenca del Arroyo Carrasco. Montevideo-Uruguay. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. 147 pp.
- MONTAÑO, J. X., DA ROSA FILHO, E. F. & HINDI, E. C. (2002). Evaluación de la Vulnerabilidad en Sistemas Fisurados.
- MONTAÑO, J. X., GUÉRÉQUIZ, R., DA ROSA FILHO, H. F., HINDI, E. C., CAZAUX, S. & MONTAÑO, M., PAMOUKAGHLIAN, K., GAGLIARDI, S., PEREIRA, A., VIDAL, H. (2002). Determinación de la Capacidad de los Sistemas Fisurados de Punta Espinillo, Montevideo – Uruguay. *Revista ALHSUD*....pp
- MONTAÑO, J., GAGLIARDI, S., MONTAÑO, M. (2006^a) Recursos hídricos subterráneos del Uruguay. *Boletín Geológico Minero*, 117 (1): 201-222.
- MONTAÑO, J., (2013). Caracterización de los sistemas hidrogeológicos discontinuos del Uruguay. Congreso Argentino de Hidrogeología. Conferencia.
- MONTAÑO, J., COLLAZO, P., MONTAÑO, M. (2014). Caracterización hidrogeológica del basamento cristalino del Uruguay. In: Bossi, J., Gaucher (Editores). *Geología del Uruguay-Tomo 1: Predevónico*. Pp 421-427, Montevideo.
- PAMOUKAGHLIÁN, K., GAUCHER, C., FREI, R., POIRÉ, D. G., CHEMALE, F., FREI, D., & WILL, T. M. (2017). U-Pb age

constraints for the La tuna granite and Montevideo formation (paleoproterozoic, Uruguay): unravelling the structure of the Río de la Plata craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 443-458. PÉREZ MATTEAUDA, A. (1993). Hidrología del sector sur de la Cuenca del Arroyo Toledo. Universidad de la República. Facultad de Ciencias. Departamento de Geología. Inédito.

RIBOT, A., BOSSI, J., CINGOLIANI, C. A., & PIÑEIRO, D. (2005). Caracterización petrográfica y cinemática de la faja milonítica Colonia – Arroyo Pavón en el Sur del Terreno Piedra Alta, Uruguay: ¿zona de cizalla principal en basamento precámbrico? XVI Congreso Geológico Argentino.

WALTHER, B. J., (1927). Contribución al conocimiento de las rocas basálticas de la Formación de Gondwana en la América del Sur. Boletín No.9. Instituto de Geología y Perforaciones. 9:1-43. Montevideo-Uruguay.

WALTHER, B. J., (1948). El basamento cristalino de Montevideo. Inst. Geol. del Uruguay. Boletín No. 33., Montevideo.