



Aspectos estratigráficos de la Formación Raigón (Plioceno) en la región de Arazatí, departamento de San José

Gonzalo Bango^a, Karina Pamoukaghlian^a, Marcos Musso^b

Recibido: 12/09/21 | Aceptado: 07/12/23 | Publicado Online: 24/05/24

RESUMEN

La Formación Raigón es el acuífero de mayor explotación del territorio uruguayo. Además, es una importante fuente de materiales granulares para la industria de la construcción. Para el uso sustentable y responsable de los recursos asociados a esta Formación, es necesario conocer sus características hidráulicas, sedimentarias y estratigráficas. En el siguiente trabajo se plantea hacer un mapeo de la distribución en el subsuelo de esta formación y las formaciones en contacto con ésta, además de conocer algunas de sus propiedades hidráulicas y sedimentarias. Para ello se levantaron perfiles estratigráficos en las barrancas costeras de la región de Arazatí, y se correlacionó lo obtenido en estos perfiles con descripciones litológicas de pozos de agua de la región. Adicionalmente se hicieron estudios granulométricos, de porosidad y conductividad hidráulica, de muestras de la Formación Raigón, extraídas de las barrancas. Los resultados mostraron que, en la totalidad de los pozos consultados, la Formación Raigón se encuentra cubierta por arcillas y limos asociados a la Formación Libertad. Dentro de la Formación Raigón existen intercalaciones de niveles de granulometría limo-arcillosa y arenosa, que hace que el sistema pueda llegar a comportarse como un acuífero multicapa. También se observa que en pozos más cercanos a la costa se hallan rocas de la Formación Camacho en contacto con la base de la Formación Raigón, y en los pozos más hacia el NE de la zona de estudio, cercanos a la ruta 1, se observan rocas de la Formación Fray Bentos en contacto con la base de la Formación Raigón. Los niveles arcillosos de la Formación Raigón presentaron valores de conductividad hidráulica del orden de 10⁻¹⁰ m/s y los niveles arenosos valores del orden de 10⁻⁴ m/s, valores propios de un acuitardo y de un acuífero, respectivamente.

Palabras clave: Formación Raigón, Cenozoico, Estratigrafía, Sedimentología, SW de San José.

✉ Gonzalo Bango: bango11@hotmail.com

Editor: Msc. Fernando Scaglia

^a Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias,
Iguá 4225, CP 11400, Montevideo, Uruguay

Cita: Bango, G., Pamoukaghlian, K., Musso M. (2023)
Aspectos estratigráficos de la Formación Raigón
(Plioceno) en la región de Arazatí, departamento de San
José - Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología 2:**25**

^b Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de
Ingeniería, Herrera y Reissig 565, CP 11300,
Montevideo, Uruguay

Doi:

Stratigraphic aspects of the Raigón Formation (Plioceno) on the Arazatí region, San José department.

ABSTRACT

The Raigón Formation is the most exploited aquifer in Uruguay. It is also an important source of granular materials for the construction industry. For the sustainable and responsible use of the resources associated with this formation, it is necessary to know its hydraulic, sedimentary and stratigraphic characteristics. In the following article it is proposed to map the subsurface distribution of the Raigón Formation and the formations in contact with it, as well as to know some of its hydraulic and sedimentary properties. For this purpose, stratigraphic profiles were taken in the coastal ravines of the Arazatí region, correlating this information with lithological descriptions of water wells in the region. Additionally, granulometric, porosity and hydraulic conductivity studies were carried out on samples of the Raigón Formation, extracted from the ravines. The results showed that in all the wells consulted, the Raigón Formation is covered by clays and silts associated with the Libertad Formation. Within the Raigón Formation there are intercalations of silty-clay and sandy granulometry levels, which makes the system behave as a multilayer aquifer. It is also observed that in wells closer to the coast there are rocks of the Camacho Formation in contact with the base of the Raigón Formation, and in the wells on the NE of the study area, near Route 1, there are rocks of the Fray Bentos Formation in contact with the base of the Raigón Formation. The clayey levels of the Raigón Formation presented hydraulic conductivity values of the order of 10^{-10} m/s, while on the sandy levels values of the order of 10^{-4} m/s were obtained, which are the typical values of aquitards and aquifers, respectively.

Key words: Raigón Formation, Cenozoic, Stratigraphy, Sedimentology, SW San José.

Localización

El área de estudio se localiza al suroeste del departamento de San José, entre las localidades de Arazatí y Rafael Perazza. Está delimitada por la ruta 1 al noreste, el Río de la Plata al suroeste, el arroyo Pereira al noroeste y el arroyo San Gregorio al sudeste (figura 1). El camino Voulminot es la única vía asfaltada que conecta a la Ruta 1 con la playa en la zona de estudio. Subordinadamente, hay una serie de caminos de balasto en las zonas más bajas. El relieve de la zona no es muy pronunciado con cotas que no superan los 60m de altura. Entre las principales actividades económicas destacan la ganadería y la agricultura de cítricos que recurren a agua de pozo para la producción. También hay una arenera con permiso para explotación hacia el sur del área de estudio sobre la costa, y un aserradero hacia el oeste. Existe un pueblo al margen del camino Voulminot y una escuela, en los cuales la fuente de agua para consumo doméstico es el agua subterránea.

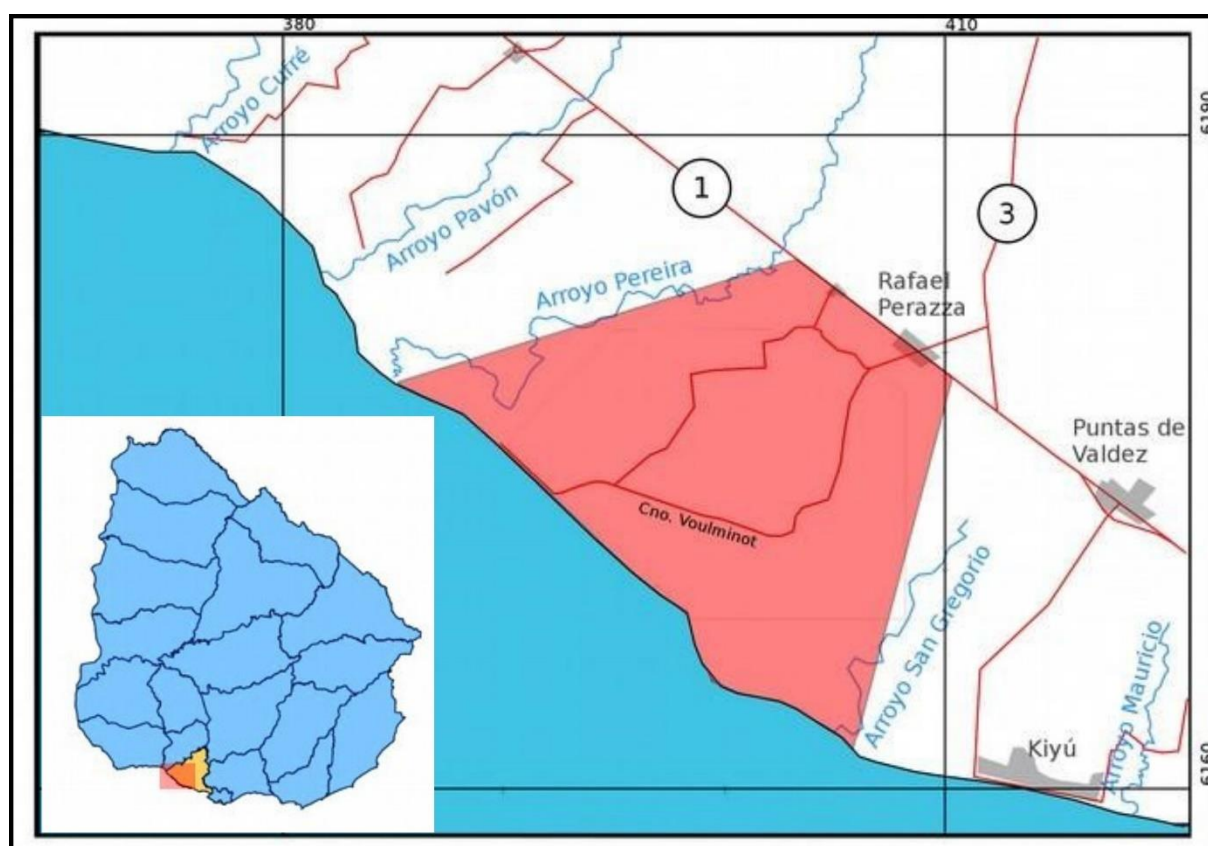


Figura 1. Mapa esquemático de la zona de estudio con principales arroyos y caminos.

Objetivos

Caracterizar sedimentológicamente a la Fm Raigón, y estudiar la estratigrafía, la porosidad y conductividad hidráulica de dicha Formación, en el suroeste del departamento de San José.

Objetivos específicos

- Realizar un estudio estratigráfico, con 4 cortes geológicos de la zona de estudio a partir de datos de perforación y perfiles estratigráficos.
- Hacer una descripción sedimentológica, estudios granulométricos, porcentaje y densidad de los minerales presentes, y porosidad de muestras de la Formación Raigón.
- Obtener datos de conductividad hidráulica a partir de muestras de las barrancas costeras de Arazatí.

Geología e hidrogeología

El área de estudio está comprendida en la región SW de la cuenca del Santa Lucía, una cuenca sedimentaria que contiene depósitos de edad jurásica hasta recientes (Veroslavsky, 2004). La génesis de esta cuenca se asocia a un evento de rift continental abortado (aulacógeno) que dio actividad volcánica en el corredor que se forma en la lineación entre y dentro de las dos cuencas (Lineamiento Santa Lucía, Aiguá, Laguna Merín).

En el área de estudio, de acuerdo con la cartografía geológica (Spoturno et al, 2004), y a los datos de perforaciones analizadas, se encontraron depósitos de edad Oligocénica hasta el Reciente (Figura 2).

De base a tope se encuentran en el área de estudio a las Formaciones Fray Bentos, Camacho y Raigón, de edades oligocénica, miocénica y pliocénica respectivamente; los depósitos cuaternarios de las Formaciones Libertad, y depósitos recientes en las playas y en las planicies de inundación de los cursos de agua.

La Formación Raigón fue definida por Goso (1965), compuesta por arenas gruesas a medias, a veces gravillosas, cuarzo-feldespáticas, de selección buena a regular. En los estratos más gravillosos, llega a ser mal seleccionada y polimíctica. Las barrancas del Río de la Plata están caracterizadas como areniscas de granulometría variable, color blanco amarillento, con lentes y niveles de arcillas verdes y conglomerados. Puede presentar concreciones calcáreas. Estos depósitos se disponen en forma interdigitada y groseramente rítmica, en niveles lentiformes con desarrollo de estratificaciones paralelas y cruzadas. (Pérez Peirano, 1991)

En cuanto a su composición mineralógica, entre los minerales livianos destacan el cuarzo, el feldespato potásico y las plagioclasas, siendo el cuarzo el mineral más abundante para la fracción arena fina. Los tres minerales presentan morfologías subangulosas a subredondeadas. (Pérez Peirano 1991) Entre los minerales pesados puede encontrarse ilmenita, magnetita, epidoto, granate, anfíbol y circón (Pérez Peirano, 1991). La concentración de estos minerales aumenta a menores tamaños de grano. En base a las características geomorfológicas a nivel de fotos aéreas, así como de su distribución espacial, y litologías, esta unidad en el sector en estudio podría asociarse a sistemas fluviales a fluviales deltaicos, desembocando en pequeñas bahías someras y tranquilas, generando niveles erosivos, de corte y relleno en la unidad inferior.

La potencia promedio de esta unidad en la zona de trabajo a nivel de afloramientos no superaría los 5 metros; mientras que en las perforaciones alcanza espesores promedios de 10 m a 15 m.

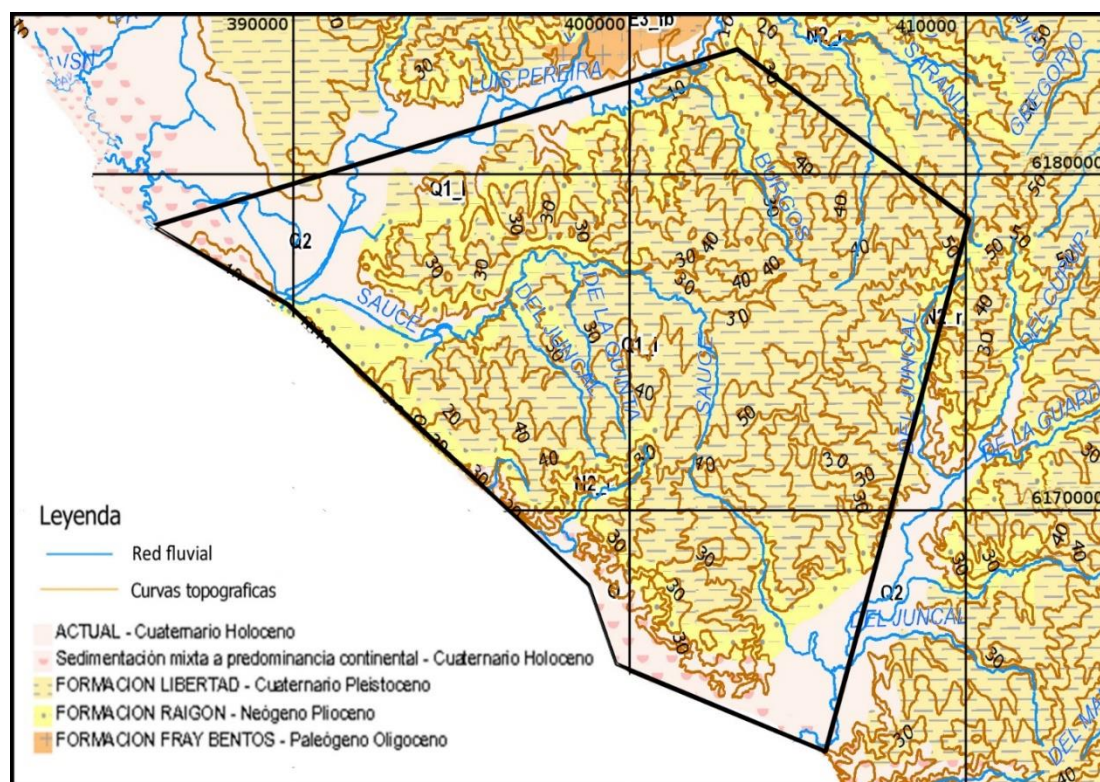


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio (Convenio de Cooperación DINAMIGE – Facultad de Ciencias, 2004).

En el mapa geológico del departamento de San José realizado por la DINAMIGE (Spoturno, 2004), esta unidad aparece cartografiada en el sector norte del Río San José en toda su extensión hasta el Arroyo de la Virgen y el Arroyo Carreta Quemada, así como a lo largo del Arroyo San Gregorio y el Arroyo Luis Pereyra. No se han observado grandes exposiciones, salvo en la zona costera, asociada a las barrancas del Río de la Plata.

La Formación Libertad fue definida por Goso (1965), como constituida por limos arcillosos y loess, pardos amarillentos. Se encuentra presente en un área importante mapeada en el Sur del país, depositándose por encima de las unidades antes mencionadas, desarrollando formas de lomadas suavemente onduladas. Litológicamente está constituida por lodolitas masivas, limos arcillosos marrones a pardo amarillentos, con un bajo porcentaje de arena gruesa y algo de gravilla, dispersa en la matriz. Dentro de estas litologías predominan los limos pardo amarillentos, con niveles de carbonato de calcio, tanto en concreciones como disperso en la matriz. Sobre los mismos se desarrolla una gran actividad productiva. En base a lo anterior, no desarrolla gran cantidad de afloramientos, generando grandes zonas con cobertura. A pesar de esto, se han encontrado algunas cárcavas, en las cuales es posible observar la Formación Libertad, así como en desmontes de caminos y en cunetas de los mismos. Su espesor, en las regiones de mayor desarrollo, guarda relación directa con la posición topográfica. A cotas relativamente altas la unidad supera los 25 metros de espesor en tanto que a cotas intermedias los espesores disminuyen considerablemente (Proyecto RLA/8/031, 2005). Esta unidad fue generada en un ambiente de estepas, árido frío, asociado a un evento glacial, en fase regresiva. Los contactos son discordantes hacia la base, con la Formación Raigón.

Se asume habitualmente que la Formación Libertad se ha depositado en el Pleistoceno Inferior y Medio, esencialmente por criterios estratigráficos. Lo que algunos interpretan como intercalación con niveles ingresivos (Formación Chuy) permitiría segregar los “eventos” Libertad I y Libertad II, que se preservarían esencialmente como terrazas elevadas y medias (Martínez & Ubilla, 2004).

El área de estudio está comprendida dentro de la región suroeste del SAR (Sistema Acuífero Raigón). El SAR cuenta con un modelo numérico en el que se estiman los niveles piezométricos del acuífero en cada región. El Mapa Hidrogeológico del Uruguay a escala 1/1000000 cita un informe de la consultora INYPSA en el que se define al acuífero Raigón como “un sistema multicapa variando de libre a confinado”. (Heinzen et al. 2003). Por otra parte, De los Santos et al. (2013) considera que a los efectos prácticos el acuífero se comporta como una sola unidad, debido a que la mayoría de los pozos atraviesan las capas arcillosas y captan agua de los distintos estratos arenosos. El proyecto RLA/8/031 estima unos valores de recarga del acuífero que rondan los 461 M m³/año con grandes variaciones dependiendo de las precipitaciones. Se trata de un valor estimativo, calculado a partir de valores de precipitación, escurrimiento, evapotranspiración y almacenamiento de agua del suelo en la totalidad de la cuenca en la que se incluye el acuífero. Este valor es superior al valor de extracción anual de 66 M m³/año, estimado por DINAMIGE en 2009, pero parte de este volumen también fluye hacia la red fluvial en contacto con el acuífero. Los mecanismos específicos a través de los cuales ocurre la recarga no se conocen en detalle.

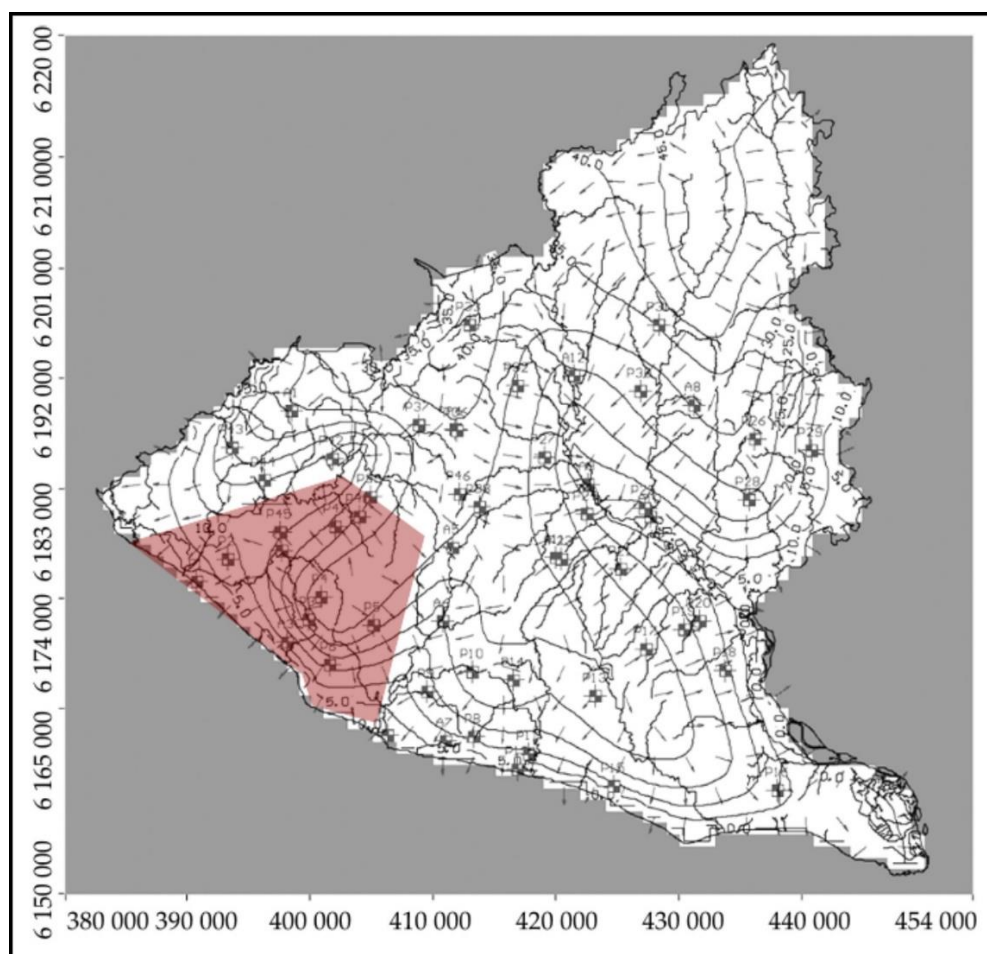


Figura 2. Modelo numérico de piezometría del SAR (De los Santos, 2013) y zona de estudio

Materiales y métodos

La realización del trabajo se llevó a cabo mediante dos etapas de gabinete, una etapa de campo y una etapa de laboratorio.

En el presente capítulo se detallan las tareas efectuadas en cada etapa, distribuidas en las siguientes fases:

Fase I.

Se revisaron antecedentes cartográficos, imágenes satelitales y fotografías aéreas realizando fotointerpretación de la zona de estudio (Figura 4), y a partir de éstos se distinguieron posibles zonas de interés donde se podrían encontrar afloramientos de la Fm Raigón, y sus vías de acceso para recorrer en campo. Una vez revisados estos datos, se planifica los recorridos para las salidas de campo, priorizando posibles puntos con afloramientos y exposición de barrancas.

También se consultaron bibliografía y publicaciones sobre las formaciones geológicas involucradas. Además, se solicitaron datos públicos en DINAGUA de perforaciones realizadas en la zona de estudio, para la elaboración de cortes geológicos a partir de estos datos.

Fase 2.

Se llevaron a cabo un total de dos salidas de campo con visitas a los puntos estratégicos planificados en la etapa previa.

Se recolectaron un total de 11 muestras con características sedimentológicas diferentes, y se registraron los sitios y las coordenadas geográficas de donde se sacaron las mismas.

En la zona de barrancas con mejor exposición de las secuencias estratigráficas, se levantaron perfiles estratigráficos, registrando observaciones sobre mineralogía, texturas, estructuras y geometría de los depósitos.

Fase 3.

En esta etapa se llevaron a cabo los distintos ensayos de laboratorio propuestos en los objetivos del trabajo.

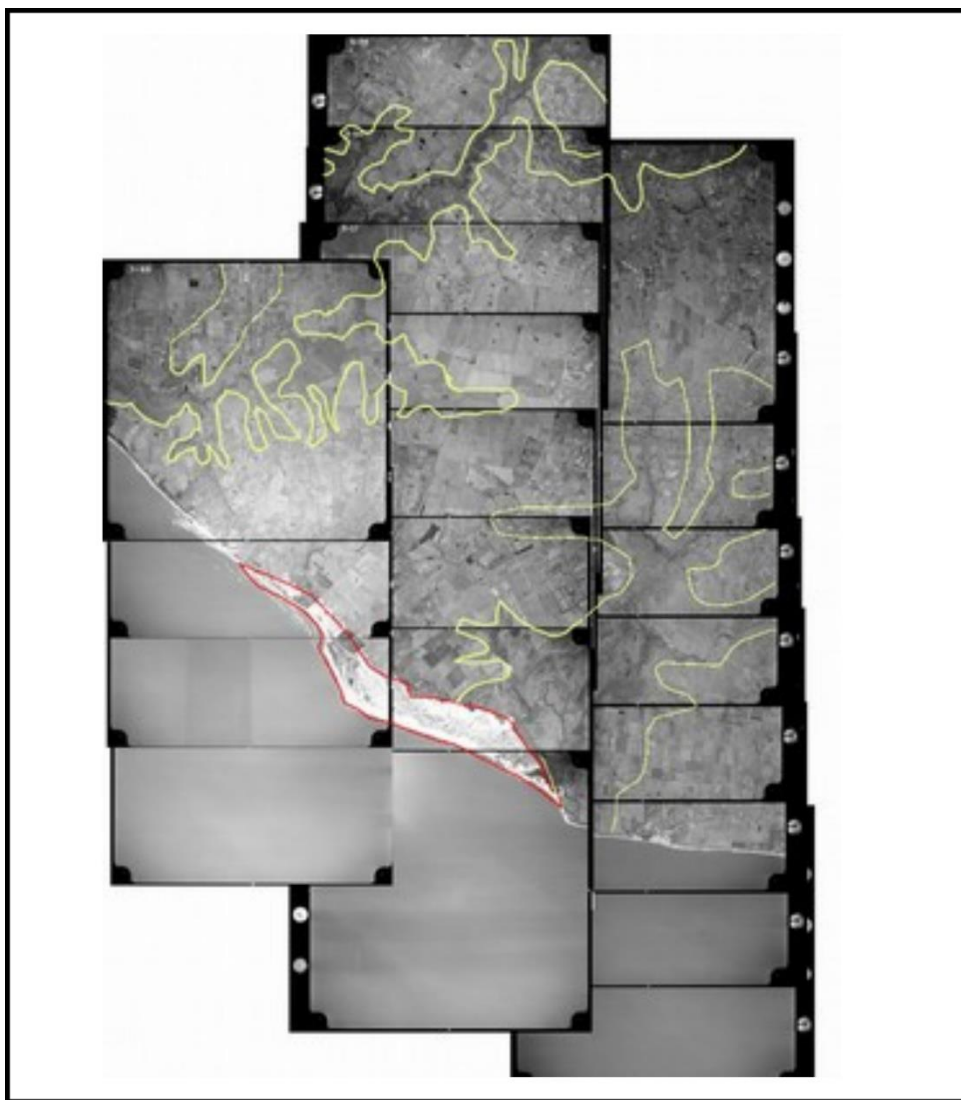


Figura 3. Mosaico de fotos aéreas con unidades fotointerpretadas (Amarillo: planicies de inundación a los márgenes de arroyos y cañadas; Rojo: campo de dunas y arenas recientes)

Análisis sedimentológico

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis granulométrico de las muestras mediante ensayos de tamizado y sedimentación para las partículas gruesas y finas, respectivamente. El procedimiento seguido es el que se detalla en la norma ASTM D 422. A partir de los datos recogidos se elaboraron histogramas de distribución de tamaños de partículas y curvas granulométricas acumulativas para cada muestra. A partir de estos datos se obtuvo la media del tamaño de grano y cuando fue posible el coeficiente de uniformidad de cada muestra. El coeficiente de uniformidad se define como “ D_{60}/D_{10} ”, donde D_{60} y D_{10} son los tamaños de abertura de los tamices ficticios en los cuales la muestra pasante de estos tamices, supondría el 60% y 10% en peso del total de la muestra, respectivamente.

Luego se determinó la densidad total, y de partículas sólidas de muestras sin deformar, para determinar la porosidad del sedimento en campo. Estos ensayos se realizaron siguiendo los pasos detallados en Nogueira (1995).

Mediante la observación en lupa, se estudió la composición mineralógica, esfericidad, angulosidad y relación esqueleto-matriz con ayuda de comparadores visuales. Se tomó como fundamento técnico para estos procedimientos la referencia de Tucker (2003).

Adicionalmente se observó en microscopio la fracción limo ($10\ \mu\text{m} < \text{tamaño de grano} < 30\ \mu\text{m}$) para determinar la presencia de vitroclastos en algunas de las muestras. La separación de la fracción limo se realizó en tubos de sedimentación (figura 6), basándose en la ley de Stokes, cuya fórmula simplificada para la sedimentación de esferas en un fluido con flujo laminar es: $v = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f)}{9 \cdot \eta}$, donde “v” es la velocidad de caída, “r” el radio de las partículas, “g” es la aceleración gravitacional, “ ρ_p ” la densidad de las partículas, “ ρ_f ” la densidad del fluido, y “ η ” la viscosidad del fluido (Lamb, 1932).

Se realizaron dos ensayos de conductividad hidráulica a carga constante: uno en una muestra donde predomina la fracción limo-arcillosa, y otro en donde predomina la fracción arena.

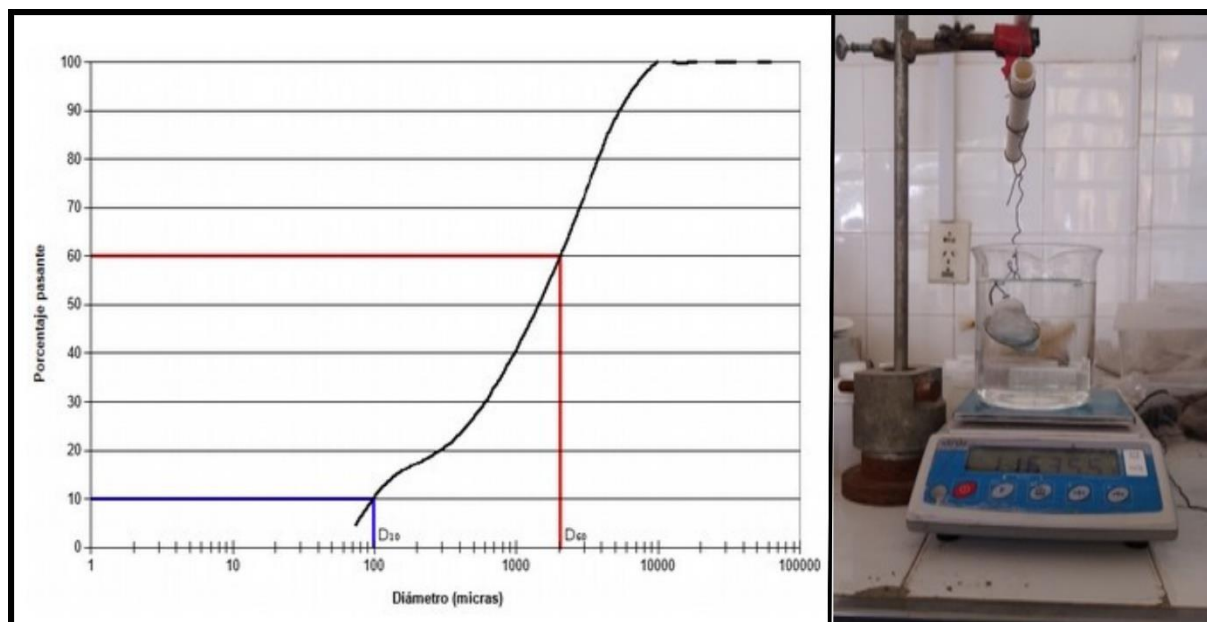


Figura 4. (izquierda) Ejemplo de curva granulométrica con D_{60} y D_{10} resaltados, (derecha) determinación de densidad por método del parafinado.

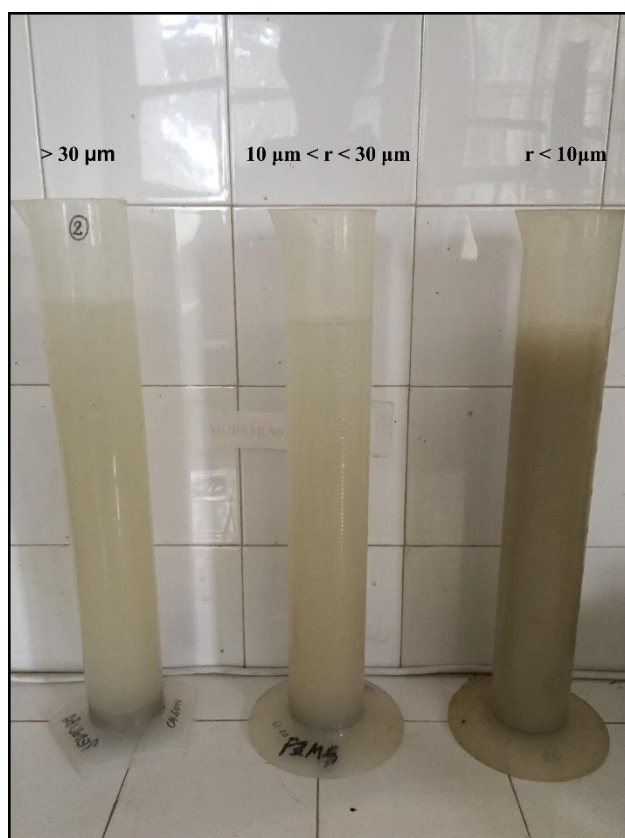


Figura 5. Separación de fracción limo (entre 10 y 30 micrómetros de diámetro).

Conductividad hidráulica

Los equipos de laboratorio (figura 7) fueron contruidos basándose en las indicaciones de la norma técnica ASTM d2434. Dicho ensayo se basa en la aplicación de la ley de Darcy: $Q = K \cdot i \cdot A$, donde “Q” es el caudal de agua que traspasa el sedimento, “K” es el coeficiente de permeabilidad a determinar, “i” es el gradiente hidráulico o pérdida de carga hidráulica que ocurre al traspasar el sedimento, y “A” es el área a través de la cual el agua fluye en el sedimento.

Este valor de permeabilidad depende de factores tanto intrínsecos como extrínsecos al sedimento a estudiar. Los factores intrínsecos son: la distribución granulométrica, la porosidad y el tipo de porosidad, la morfología y distribución de los clastos, la mineralogía, y el grado de saturación del sedimento.

Los factores extrínsecos son: la temperatura, la composición y la viscosidad del fluido.

En condiciones controladas de temperatura, fluido utilizado, carga hidráulica, área de la sección de la sección perpendicular al flujo del agua, y midiendo el caudal (volumen sobre unidad de tiempo) del agua que traspasa el sedimento, se puede determinar el coeficiente de permeabilidad del sedimento analizado.

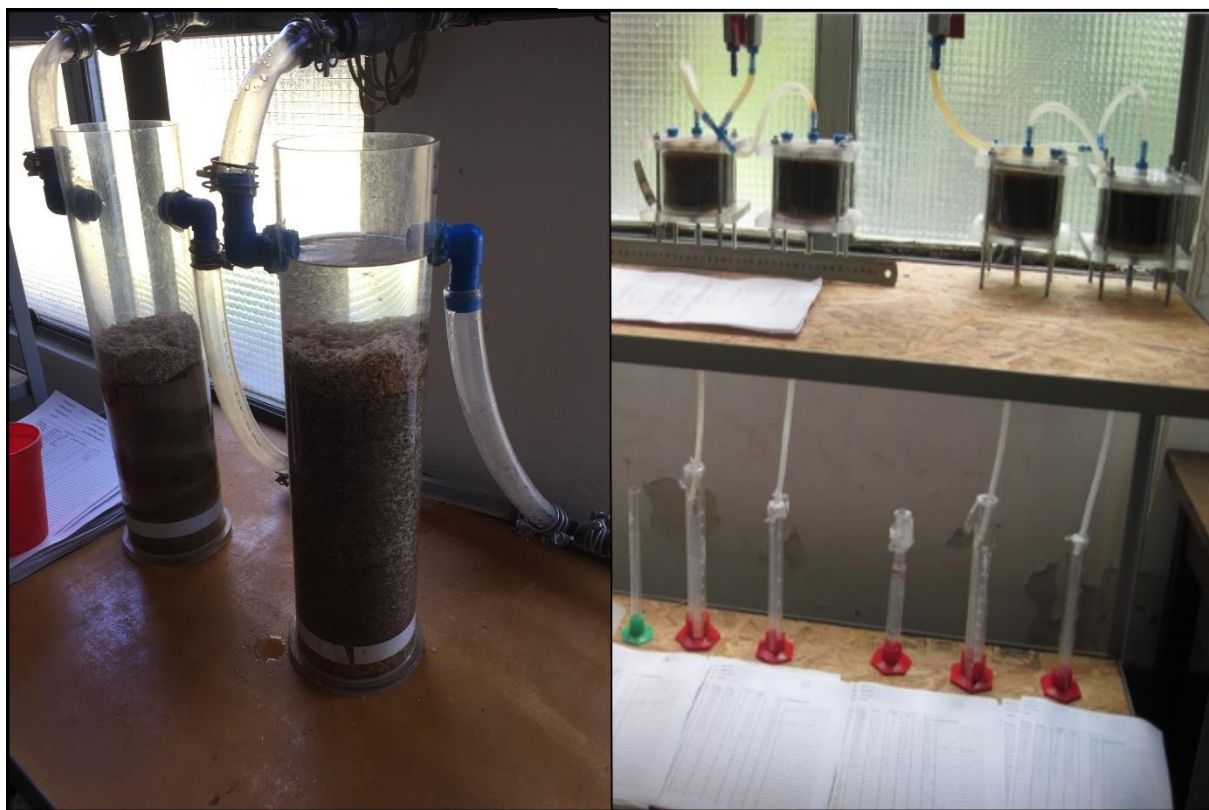


Figura 6. Ensayos de conductividad hidráulica para sedimentos gruesos (izquierda) y para sedimentos finos (derecha).

Resultados.

Se extrajeron muestras de las barrancas costeras, en 4 sitios distintos, en niveles arenosos y arcillosos de la Fm. Raigón. La localización de las muestras se detalla en la figura 8.

Análisis granulométrico.

Las curvas granulométricas e histogramas obtenidos corresponden en su mayoría a sedimentos arenosos con distintos grados de selección, y contenido de finos que no superaron el 10% en peso en la mayoría de los casos. Solo dos muestras (s11m2 y s14m2) resultaron ser muestras mayoritariamente limo-arcillosas. La muestra s3m4 clasificada como arena, presenta un importante porcentaje de finos (limos y arcillas) de alrededor de 30%.



Figura 7. Localización de sitios de extracción de muestras y levantamiento de perfiles.

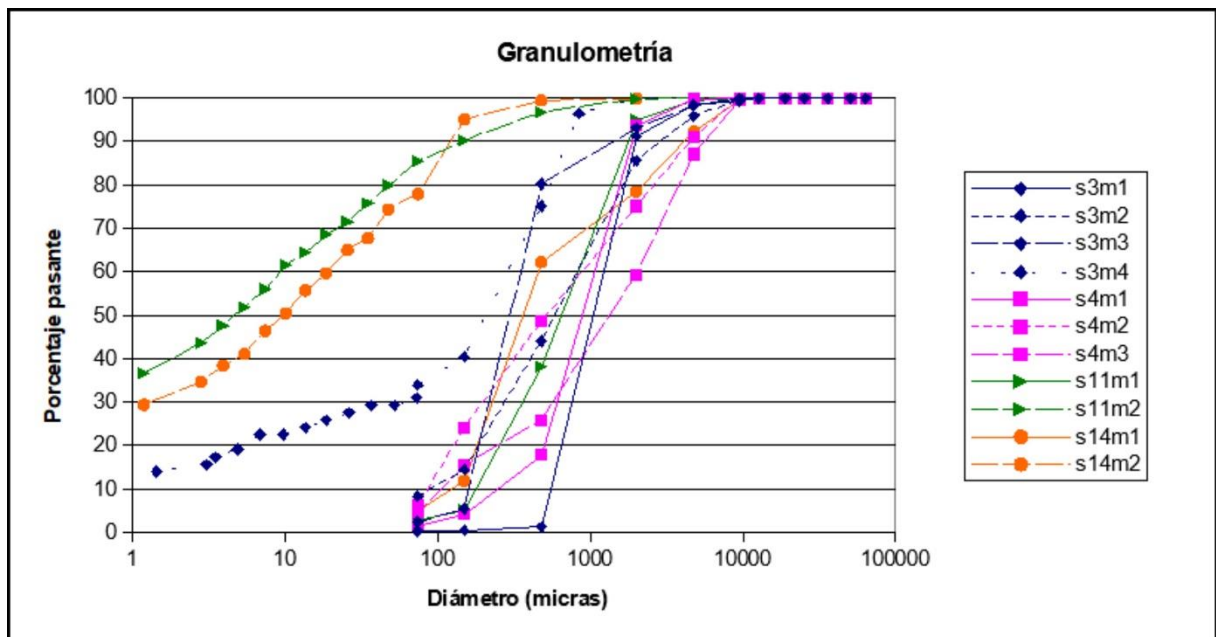


Figura 8. Curvas granulométricas acumulativas

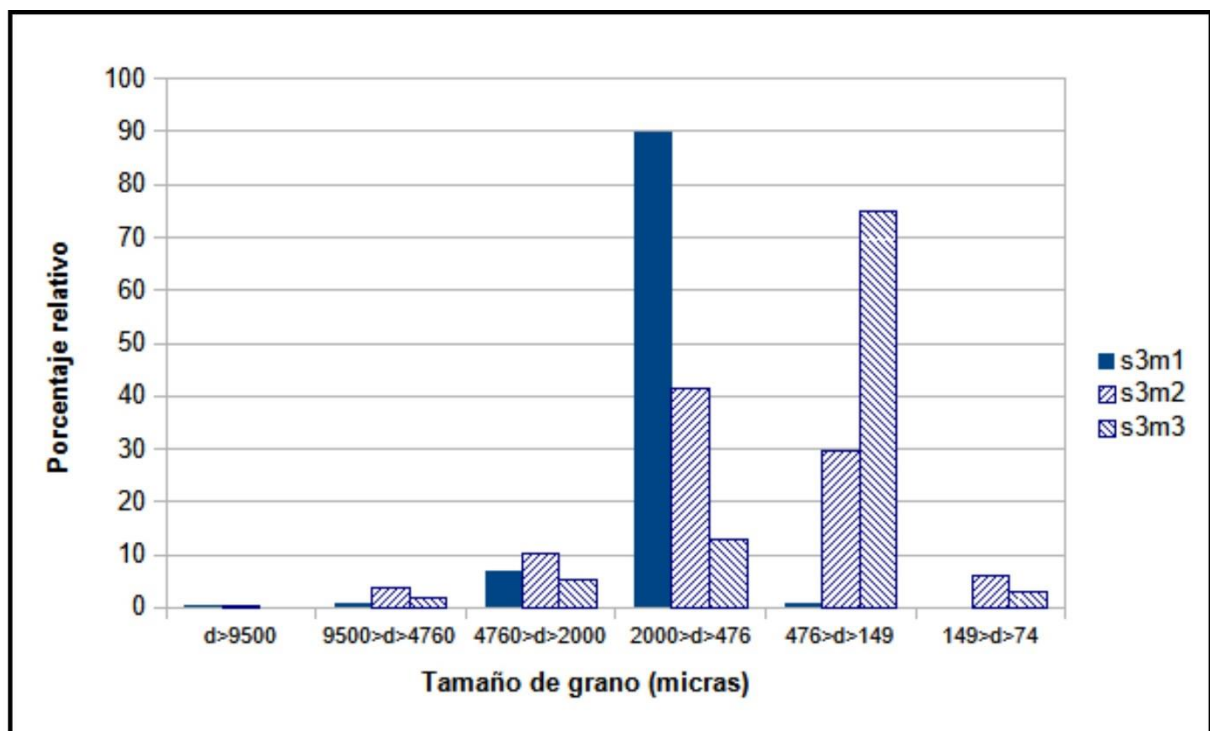


Figura 9. Histograma de distribución granulométrica de muestras del sitio 3.

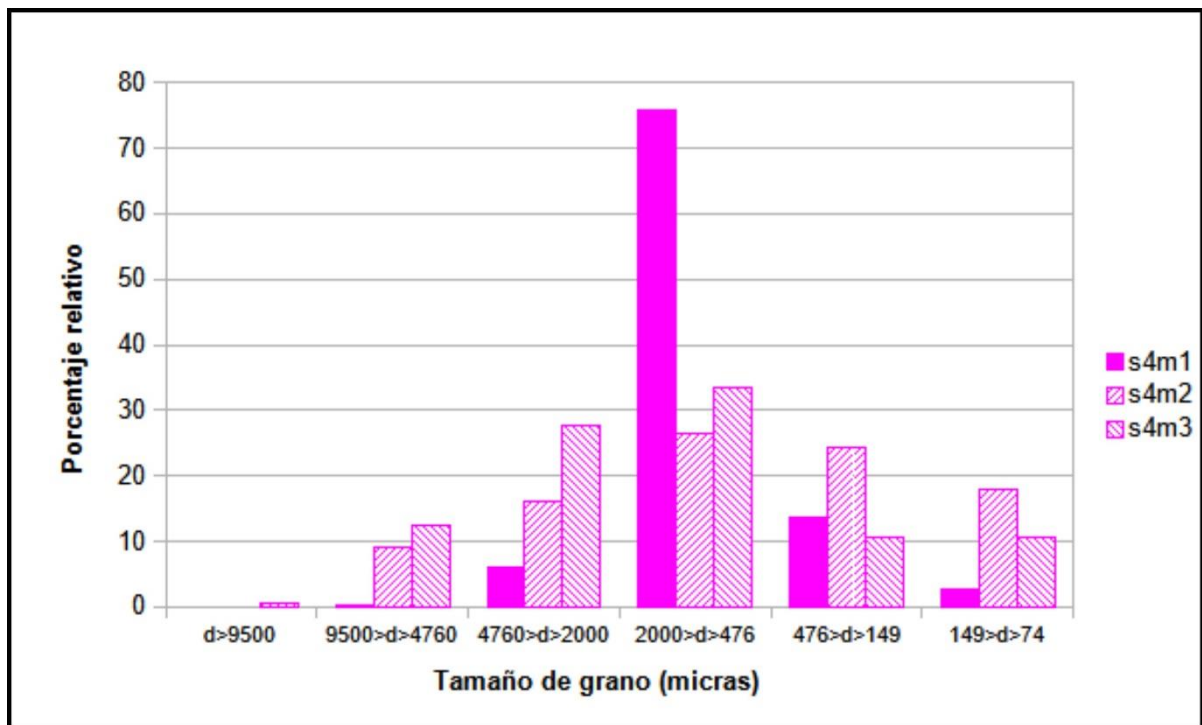


Figura 10. Histograma de distribución granulométrica de muestras del sitio 4.

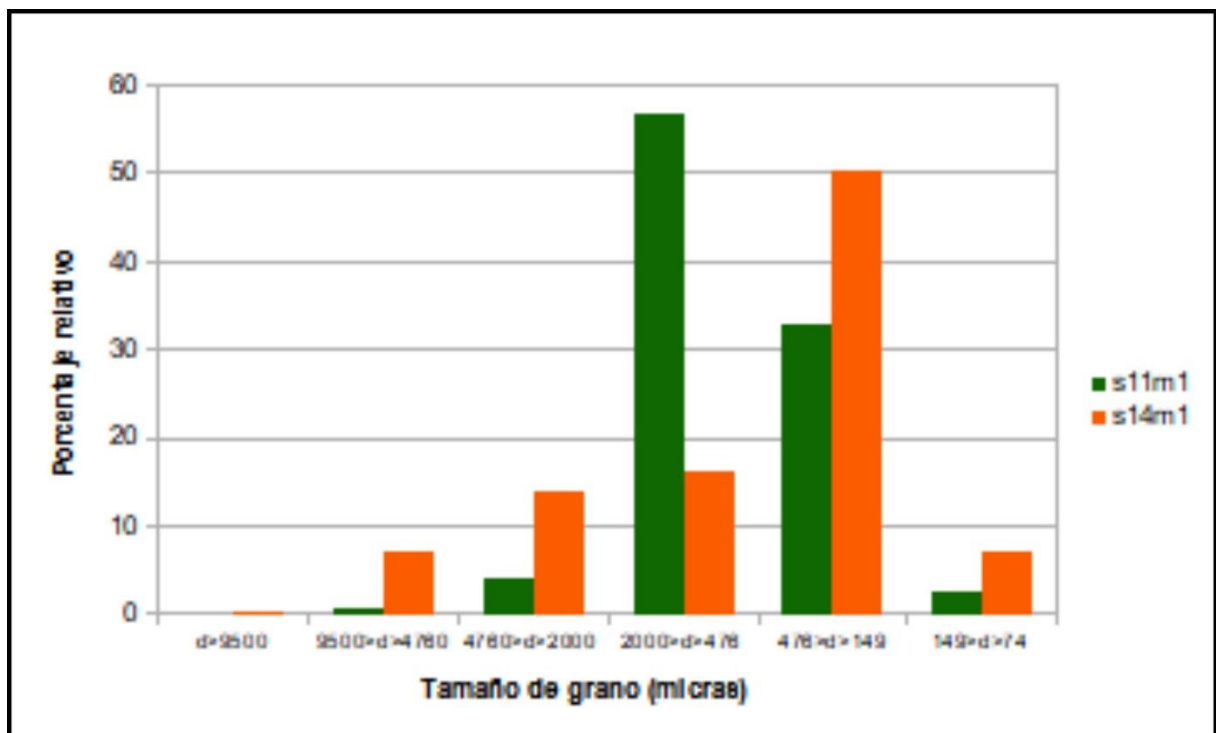


Figura 11. Histograma de distribución granulométrica de las muestras del sitio 11 y 14.

Tabla 1. Resumen de propiedades índice determinadas para cada muestra.

Muestra	Litología	Media (micras)	Cu (coeficiente de uniformidad)	Densidad de sólidos (g/cm ³)	Densidad seca (g/cm ³)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica (m/s)
S3M1	Arena	1541	2,22	2,70	s.d.	s.d.	1,0E-04
S3M2	Arenisca	1188	9,20	2,70	1,57	42	
S3M3	Arenisca	809	4,40	2,70	1,54	43	
S3M4	Arenisca	194	s.d.	2,70	1,68	38	
S4M1	Arenisca	1295	4,32	2,70	1,72	36	
S4M2	Arenisca	1176	10,28	2,70	1,72	36	
S4M3	Arenisca	1766	19,48	2,70	1,74	36	
S11M1	Arenisca	1106	6,34	2,70	1,55	43	
S11M2	Pelita	45	s.d.	2,74	1,78	35	1,0E-10
S14M1	Arenisca	1093	11,08	2,70	1,58	41	
S14M2	Pelita	54	s.d.	2,74	1,77	35	

Media granulométrica

La mayoría de las muestras presentan medias granulométricas en el entorno de los 1000 micrómetros (arena media). Las muestras pelíticas arrojaron medias en el entorno de los 50 micrómetros (limo).

- **Coeficiente de uniformidad:** se obtiene a partir de la curva granulométrica. Valores mayores a 6 indican una mala selección de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)
- **Densidad de partículas sólidas:** Los resultados obtenidos se acercan a los valores de densidad del cuarzo y del feldespato (alrededor de 2,65 g/cm³), lo cual coincide con lo observado en lupa y microscopio.
- **Densidad total seca:** Se obtuvieron resultados que oscilan entre 1.55 y 1.75 g/cm³. Los distintos valores pueden explicarse por las diferencias de cementación y contenido de matriz fina entre las muestras.
- **Porosidad:** Los resultados de porosidad varían entre 35% y 43%. Representa la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de una roca o suelo. Estos valores se deducen directamente de los valores de densidad de sólidos y de densidad total seca.

Conductividad hidráulica

Se realizaron dos ensayos de conductividad hidráulica a muestras de características granulométricas y de porosidad contrastantes. Los valores obtenidos se diferenciaron en varios órdenes de magnitud (10^{-4} a 10^{-10} m/s), como se observa en la figura 13. La muestra de sedimentos finos resultó mucho menos permeable que la muestra arenosa analizada.

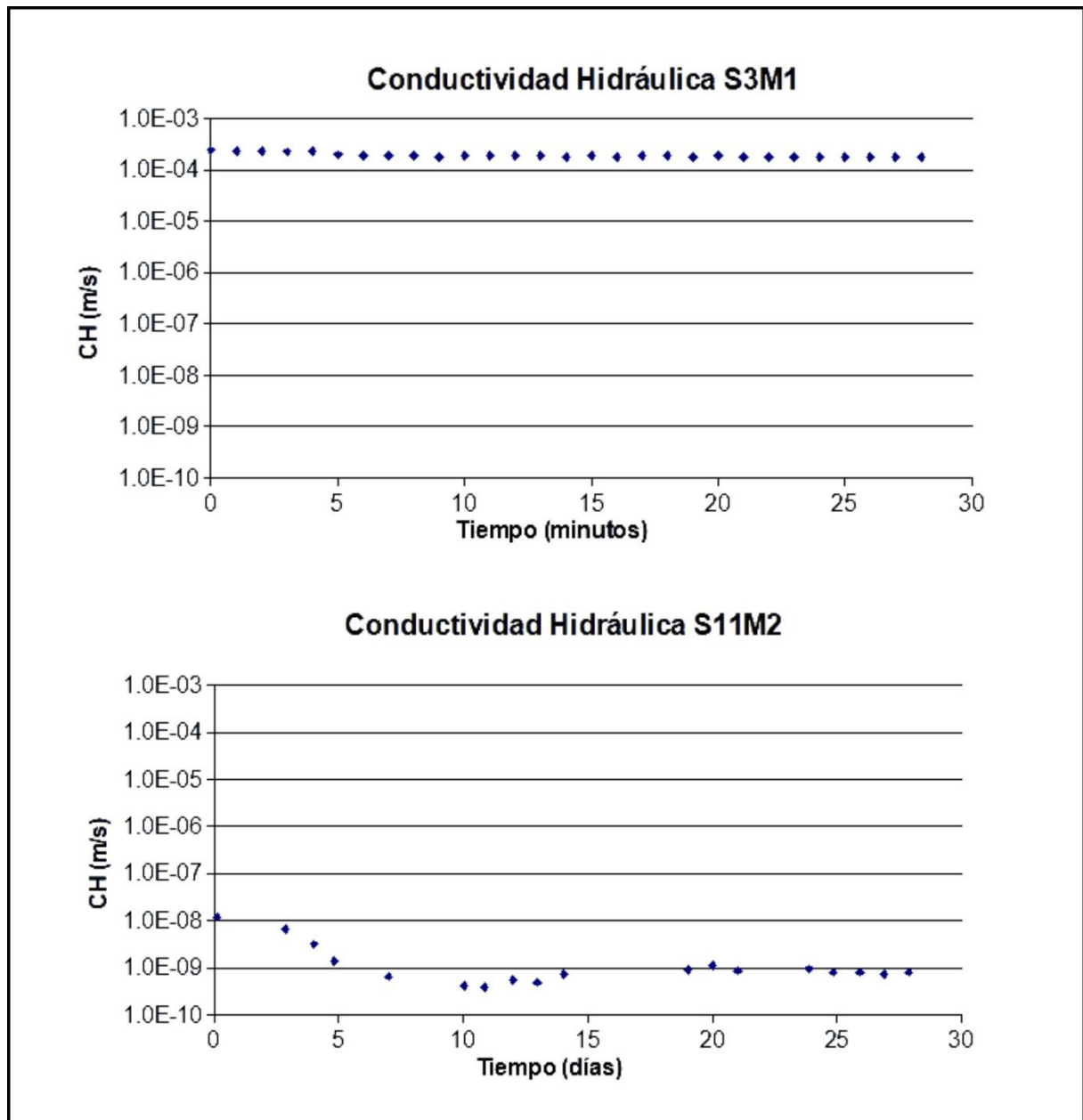


Figura 12. Ensayos de conductividad hidráulica.

Cortes geológicos

A continuación, se presentan 4 cortes geológicos de la zona de estudio (figura 14).

El criterio utilizado para la elección de los cortes fue basado en la cantidad y calidad de información litológica y piezométrica de los pozos que estuvieran presentes en la proximidad de la trayectoria de los cortes. Además, los cortes geológicos deben interceptarse de forma tal que se pueda confeccionar un bloque diagrama 3d a partir de éstos. La información interpretada de los datos de pozos nos arroja una primera aproximación a la geometría y la correlación de los depósitos evidenciables en las figuras 15A y 15B. Algunos de los pozos no diferenciaron entre las fracciones finas y arenosas de la Formación Raigón. En estos casos la información se interpretó siguiendo criterios estratigráficos y el principio de parsimonia.

En los 4 cortes se observan niveles arcillosos de la Formación Raigón (a veces más de uno), que separan los niveles arenosos que componen el acuífero.

En los cortes 3 y 4, en el extremo SW, se evidencia el contacto de la Formación Camacho con la Formación Raigón. Dicho contacto, a medida que se avanza hacia el NE, se encuentra a mayor profundidad en el corte 4, y deja de observarse en los pozos del corte 3.

Otro aspecto observable en los cortes geológicos es que la Formación Raigón se encuentra en la totalidad del trayecto de los cortes, recubierta por depósitos de espesores variables de limos y arcillas, atribuidos a la Formación Libertad.

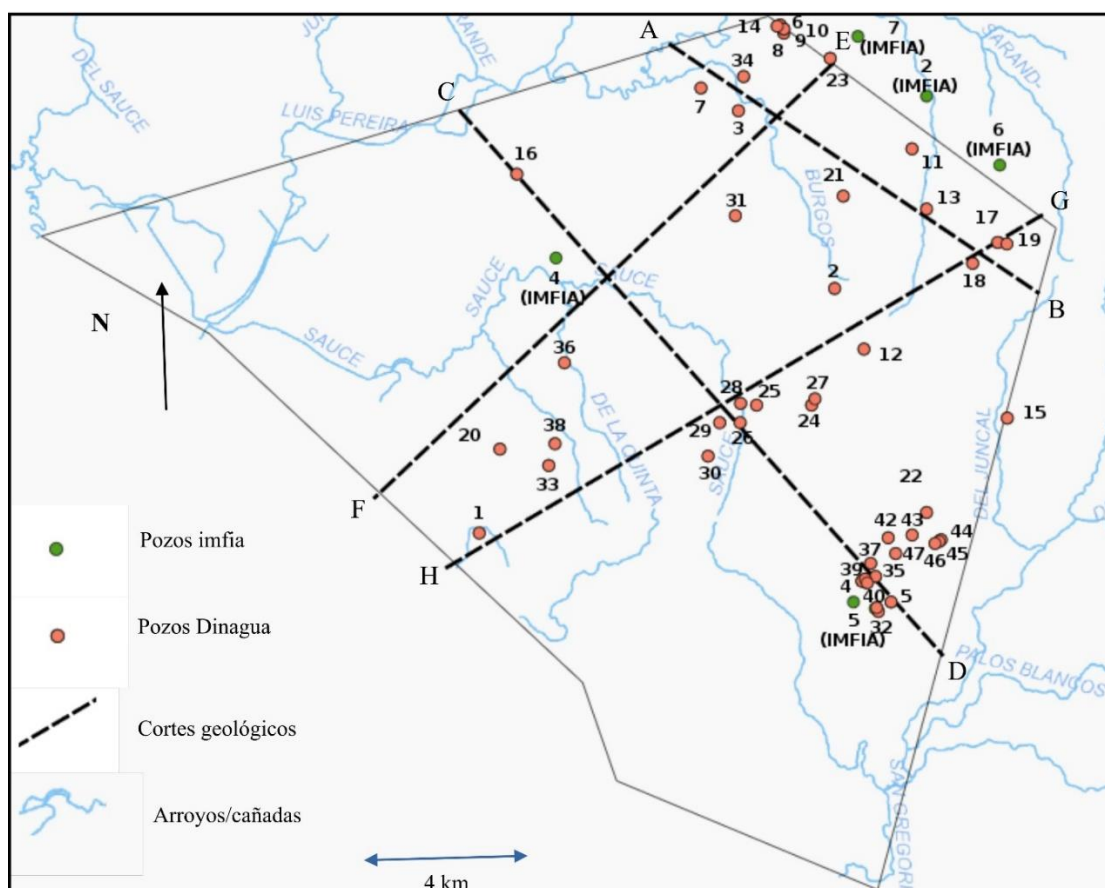


Figura 13. Zona de estudio con localización de pozos y cortes geológicos.

Al colocar en perspectiva los cortes geológicos sobre el mapa geológico de San José a escala 1/100000, se observa que los lugares de cotas más bajas de los cortes (menor a los 20m), coincide con los sitios donde fue localizada la Formación Raigón en dicho mapa. En los datos de pozos y en lo observado en campo, lo que se observa en estos lugares no es la Formación Raigón aflorante, si no a la Formación Libertad con un espesor menor al que presenta en zonas de interfluvios.

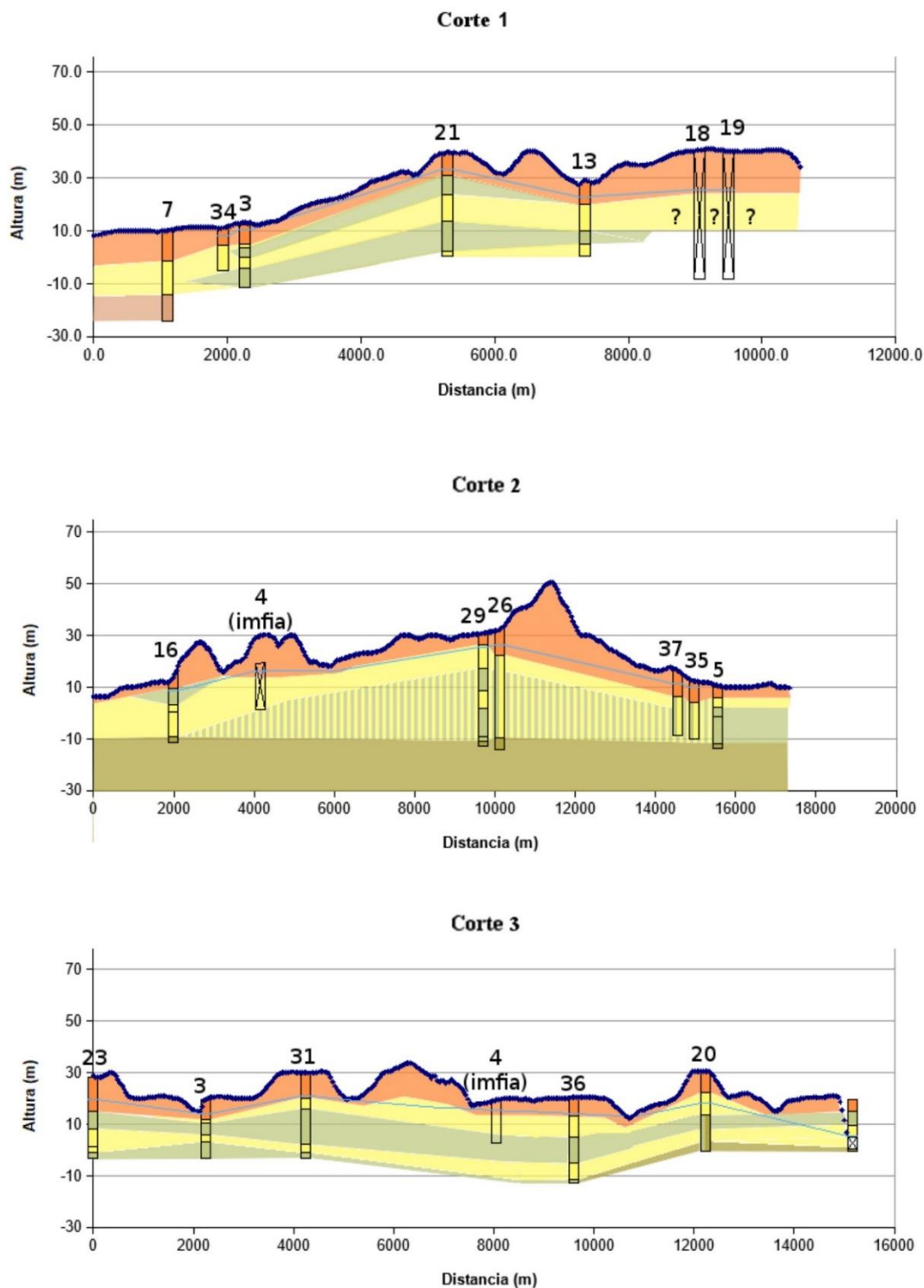


Figura 14-A. Cortes geológicos 1 al 3.

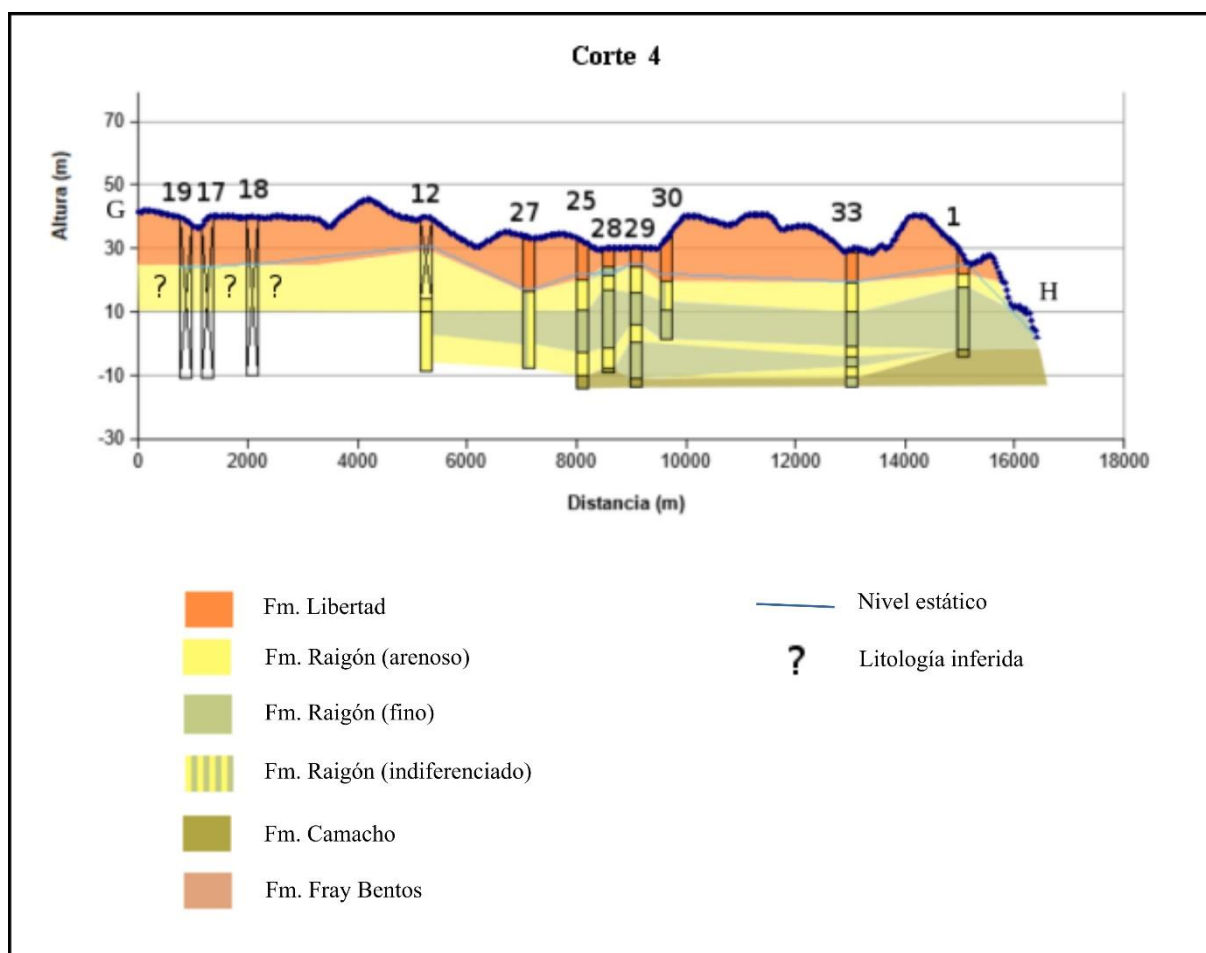


Figura 15.B Corte geológico 4 y leyenda.

Discusión

Análisis sedimentológico

Las muestras analizadas presentaron tamaños de grano que fueron desde las arenas gruesas a gravillosas en determinados niveles, hasta tamaños limo-arcilla en otros.

El grado de selección granulométrico varía entre las distintas muestras, habiendo muestras como S3M1 con muy buena selección, y muestras como S3M4 que presenta granos de tamaño desde limo-arcilla hasta arenosos.

Se obtuvieron valores de porosidad y densidad similares para todas las muestras, registrándose porosidades levemente menores y densidades levemente mayores en las muestras con mayor contenido de sedimentos finos.

Estratigrafía/Cortes geológicos

Se obtuvieron perfiles estratigráficos muy similares al diagramado por Perea y Martínez (2004). En los mismos, las transiciones de tamaños arena a limo-arcilla se dan de forma gradual y cíclicamente hacia

techo, generando secuencias grano y estrato decrecientes. La continuidad lateral de los estratos se corrobora en la zona de barrancas donde se levantaron los perfiles. La facies descritas en los perfiles se asemejan a las descritas para los canales abandonados de un ambiente deltaico (figura 17, Arche, 1992), o a ambientes de estuarios y llanuras intermareales similares a los de la figura 18 (Vilas, 1992).

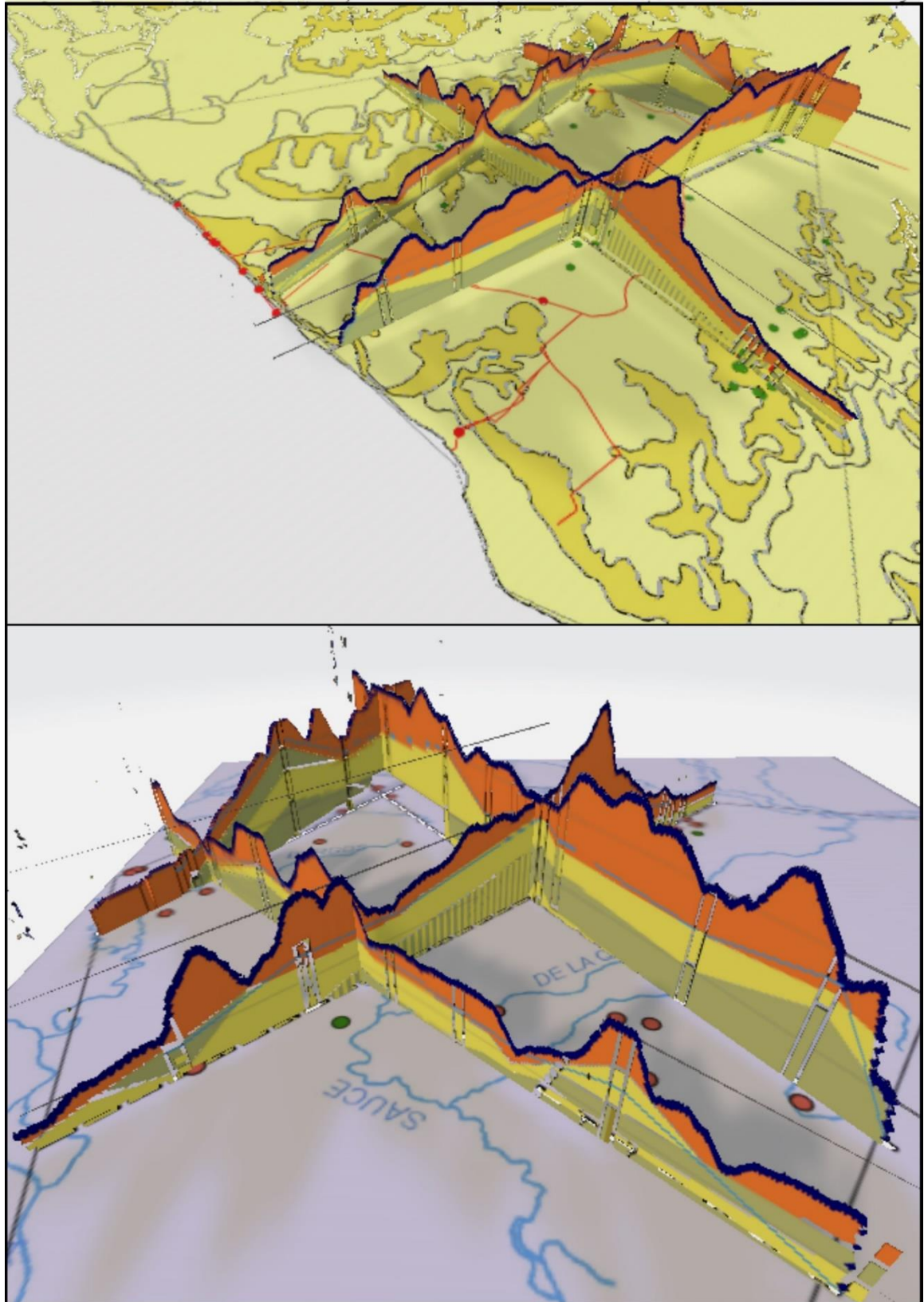


Figura 15. Bloques diagrama que incluyen todos los cortes en perspectiva.

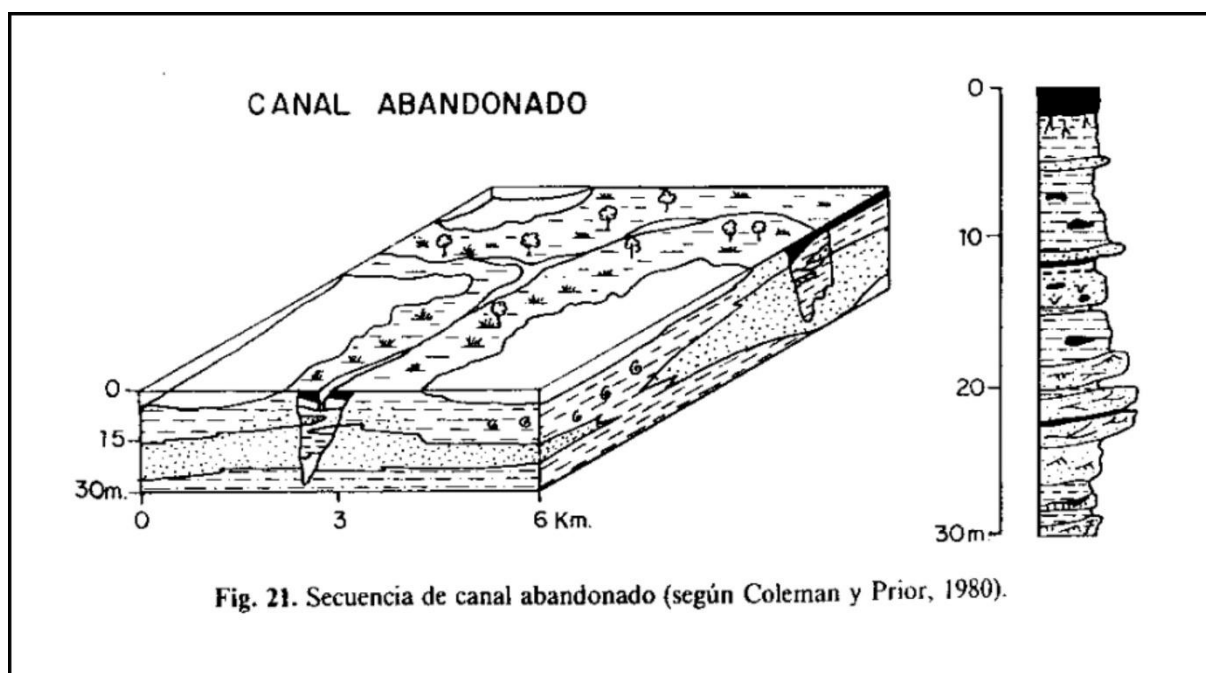


Figura 16. Secuencia de canal abandonado según Coleman y Prior, 1980, en Arche (1992).

Los cortes geológicos evidencian para los primeros 40 a 50 metros de profundidad, entre 2 y 3 capas de niveles arenosos de Raigón, separadas por niveles de espesor variable de capas de material fino de menor permeabilidad. Esta variabilidad de los espesores y la profundidad de los distintos niveles de Raigón podrían responder a la geometría de la cuenca en la que se depositaron los sedimentos, o, en algún caso, a posibles fallas.

El espesor de la Fm. Raigón para el área de estudio (incluyendo sus capas arenosas y limo-arcillosas) no supera los 40 m y no disminuye de los 5 m (en zona de barrancas).

También se observa en la totalidad de las descripciones de pozos consultadas, que la Formación Raigón se encuentra confinado por sedimentos de la Fm. Libertad en la mayoría de las descripciones de pozos. En zonas de interfluvios el espesor de Libertad es mayor alcanzando los 20m de espesor. En algunos pozos el nivel estático registrado se encuentra por debajo de la base de la Fm. Libertad, por lo que, en términos hidrogeológicos, en estos puntos, la Fm. Raigón tendría el comportamiento de un acuífero libre.

El contacto en la base de la Formación Raigón en los pozos más cercanos a la costa tiende a ser con la Fm Camacho (origen marino), mientras que en los pozos descritos más cercanos a la Ruta 1 se observa que el contacto con la base es con la Fm Fray Bentos (origen continental).

Conductividad hidráulica

Se realizaron dos ensayos de conductividad hidráulica en muestras de la Fm Raigón con granulometrías contrastantes (una arenosa y una limo-arcillosa). Si asociamos los resultados obtenidos en estos ensayos con las formaciones arenosas y limo-arcillosas descritas en los pozos de agua, se estaría corroborando lo

mencionado en los antecedentes hidrogeológicos, referido a que el Sistema Acuífero Raigón es un sistema multicapa separado por estratos arcillosos de menor permeabilidad.

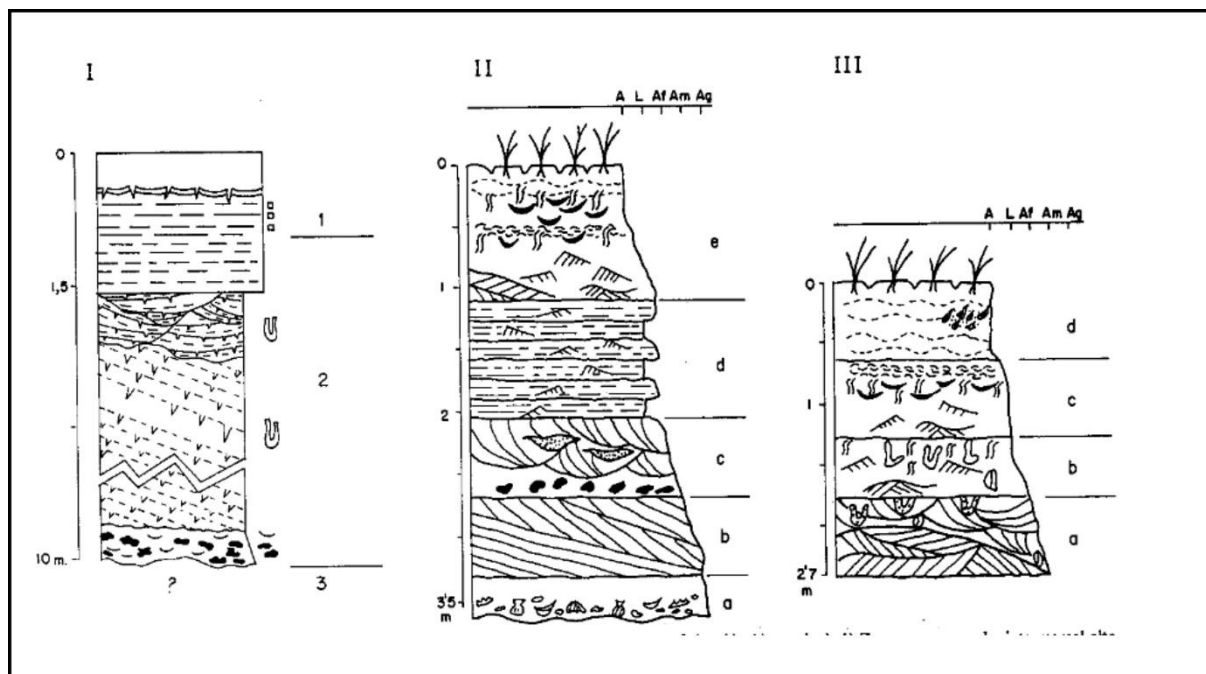


Figura 17. Diferentes tipos de secuencias teóricas verticales para las llanuras bajas de un ambiente de estuario y llanuras intermareales. I: Llanura mareal lutítica de San Sebastián (Argentina), II: Margen de canal mareal (Ensenada de San Simón, Ría de Vigo, III: Parte central de la llanura intermareal de la Ensenada de San Simón, Ría de Vigo. (Vilas, 1992).

Conclusiones y recomendaciones

1. Se logró hacer un análisis sedimentológico, estratigráfico y de las propiedades hidráulicas de la Formación Raigón, gracias al procesamiento de la información existente en las bases de datos consultadas, y a la información generada con el trabajo de campo y los ensayos de laboratorio. La información coincide en gran parte con lo esperado de acuerdo a los antecedentes que existían sobre la Formación Raigón.
 - La fracción granulométrica predominante de la Formación Raigón es el tamaño arena, si bien algunos estratos gradan a predominantemente limo-arcillosos. La selección es variable para distintos niveles de la Formación.
 - Existe más de una capa de espesor variable, compuesta de sedimentos finos y de baja permeabilidad. Estas capas se encuentran separando los distintos niveles predominantemente arenosos de la Fm. Raigón que componen el acuífero propiamente dicho.

- Se determinó la conductividad hidráulica para una muestra arenosa y para una muestra limo-arcillosa de la Fm. Raigón. Las conductividades hidráulicas obtenidas para cada muestra, se corresponden con valores propios de un acuífero para la muestra arenosa, y de un acuitardo para la muestra limo-arcillosa.
- 2. La expresión en superficie de la Formación Raigón es mínima debido a la cobertura edáfica que presenta el área de estudio, y por encontrarse casi en la totalidad de su extensión confinada por la Formación Libertad o por sedimentos Recientes. En las zonas visitadas donde se encuentra mapeada la Fm. Raigón, ésta no es apreciable en superficie.
- 3. La información litológica de las perforaciones del área de estudio no tiene un formato común para todos los pozos. Como consecuencia mucha de esta información es poco adecuada para su aplicación en este tipo de trabajos. Un protocolo para las descripciones litológicas durante las perforaciones mejoraría la calidad de la información geológica generada.
- 4. Como complemento para este trabajo, se podría analizar un mayor número de muestras de otras procedencias para comprobar si existe variabilidad composicional en la Formación Raigón. Además, se podría complementar la información de laboratorio generada con ensayos de permeabilidad de campo (ensayos de infiltración/bombeo), y análisis químicos que pudiesen dar indicios de la dirección, sentido y velocidad del flujo del agua del acuífero en el área.

Contribuciones

El presente trabajo presenta los resultados de la tesis de grado de Gonzalo Bango, siendo Karina Pamoukaghlian su Orinetadora y Marcos Musso su Co-Orientador

Referencias

- Arche, A (1992): “Deltas”, en Arche, A. “Sedimentología, Volumen 1”. Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid.
- ASTM D 422 – 63 (1998): Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils
- ASTM D 2434 – 68 (2006): Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)
- Bessouat, C; De Souza, S; Oleaga, A; Pacheco, F (2000): “Acuífero Raigón – Parte 1: Caracterización Geohidrológica”, en 1st Joint World Congress on Groundwater.
- Bossi, J. (1966): “Geología del Uruguay”, en Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo.

- Caorsi, J. H. & Goñi, J. C. (1958): “Geología uruguaya”, en Boletín del Instituto Geológico de Uruguay, núm. 37, 1-73.
- De los Santos (1998): “Modelación numérica del acuífero Raigón”. Proyecto CONICYT-BID 71/94. Montevideo: IMFIA, Universidad de la República, Uruguay, 80pp.
- De los Santos, J & Hernández-García, G (2013): “Modelación numérica de un acuífero mediante dos esquemas representativos: Raigón, Uruguay”, en Tecnología y Ciencias del Agua, vol. IV, num. 4, 151-158.
- De Santa Ana, H & Ucha, N (1994): “Exploration perspectives and hydrocarbon potential of the Uruguayan sedimentary basin”, en División Investigación y Desarrollo, ANCAP. Montevideo. Informe interno, 98 pp.
- Goñi JC & Hoffstetter R (1964): “Uruguay”, en Lexique Stratigraphique International, 5 Amérique Latine, 9a., París: CNRS, 1-202 pp.
- Goso, H. (1965): “El Cenozoico en el Uruguay”, en Instituto Geológico del Uruguay. Informe interno, Uruguay. - (1972): “Cuaternario. Prog. de Estudio y Levantamiento de Suelos”, Montevideo
- Heinzen, W; Carrión, R; Massa, E; Pena, S; Stapff, M (2003): República Oriental del Uruguay - Mapa Hidrogeológico escala 1/1000000. Disponible en: https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/carta_hidrogeologica_del_uruguay_version_2000.pdf
- Lamb, H. (1932): “Hydrodynamics”. Cambridge University Press pp. 599
- Mañay, N; Goso, C; Pistón, M; Fernández-Turiel, J.L; García-Vallés, M; Rejas, M; Guerequiz, R (2013): “Groundwater Arsenic Content In Raigón Aquifer System (San José, Uruguay)”, en Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología, núm. 18, 20–38.
- Martínez, S; Ubilla, M (2004): “El Cuaternario en Uruguay”, en Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. Eds. “Cuencas sedimentarias de Uruguay, tomo Cenozoico”. DIRAC. Montevideo, Uruguay. pp. 195-230.
- Martínez, S; Ubilla, M; Verde, M; Perea, D; Piñeiro, G (2001): “Paleoecology and Geochronology of Uruguayan Coastal Marine Pleistocene Deposits”, en Quaternary Research, núm. 55, 246-254.
- Martínez S (1994): “Bioestratigrafía (invertebrados) de la Formación Camacho (Mioceno, Uruguay)”, en Tesis Ph.D. 346 pp. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Argentina.
- MTOP; MVOTMA; MIEM; OSE; FCIEN; Peel, E. et al. (2005): Gestión Sostenible del Acuífero Raigón Uruguay, Informe Técnico Final del Proyecto Regional de Cooperación Técnica RLA/8/031, 166 , 6.
- Nogueira, J B. (1995): Mecânica dos Solos – Ensaio de Laboratório. Sao Carlos: EESC-USP, pp. 248.
- Ortiz, A. & Bossi, J. (2011): “Geología del Holoceno”. Departamento de Publicaciones, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República (UCUR).

- Perea, D. & Martínez, S. (2004): “Estratigrafía del Mioceno-Pleistoceno en el litoral Sur-Oeste de Uruguay”, en Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. eds. “Cuencas sedimentarias de Uruguay, tomo Cenozoico”. Montevideo: DIRAC, pp. 105-124.
- Pérez Peirano, M. (1991): “Sédimentologie et stratigraphie des formations Raigon et Libertad, plio-pléistocène, au sud-ouest de San José, bassin de Santa Lucia, Uruguay”. Tesis de Maestría en ciencias de la tierra, Québec: Universidad de Montreal.
- Preciozzi, F; Spoturno, J; Heinzen, W; Rossi, P (1985): “Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500,000.”. DINAMIGE, Montevideo.
- Reckziegel F; Bustos, E; Mingari, L; Báez, W; Villarosa, G; Folch, A; Collini, E; Viramonte, J; Romero, J; Osorio, S (2016): “Forecasting volcanic ash dispersal and coeval resuspension during the April–May 2015 Calbuco eruption”. Journal of Volcanology and Geothermal Research 321 (2016) 44–57
- Spoturno, J.J; Oyhançabal, P; Aubet, N; Cazaux, S (2004): “Mapa geológico y de recursos minerales del departamento de San José a escala 1/100.000”. Proyecto CONICYT 6019
- Sprechmann P (1978): “The paleoecology and paleogeography of the Uruguayan coastal area during the Neogene and Quaternary”. Zitteliana
- Stoakes FA, Campbell CV, Cass R & Ucha N (1991): “Seismic stratigraphic analysis of the Punta del Este Basin, offshore Uruguay, South America”. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 75 (2): 219-240.
- Tofalo, O R, Etchichury M C, Fresina M (2005): “Características texturales y petrofacies de depósitos neógenos, Bancalari, provincia de Buenos Aires”. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60 (2): 316-326.
- Tucker, M (2003): “Sedimentary Rocks in the Field”. Department of Geological Sciences, University of Durham, UK.
- Ubilla, M. (2004): “La Formación Fray Bentos (Oligoceno Tardío) y los mamíferos más antiguos de Uruguay”. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. Eds. “Cuencas sedimentarias de Uruguay, tomo Cenozoico”. DIRAC. Montevideo, Uruguay. pp. 83-104.
- Veroslavsky, G; De Santa Ana, H; Rosselo, E. (2004): “Depósitos del jurásico y cretácico temprano de la región meridional del Uruguay”, en: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. “Eds. Cuencas sedimentarias de Uruguay, tomo Mesozoico”. DIRAC. Montevideo, Uruguay. pp. 117-142.
- Vilas, F (1992): “Estuarios y llanuras intermareales”, en Arche, A. “Sedimentología, Volumen 1”. Consejo superior de investigaciones científicas, Madrid.