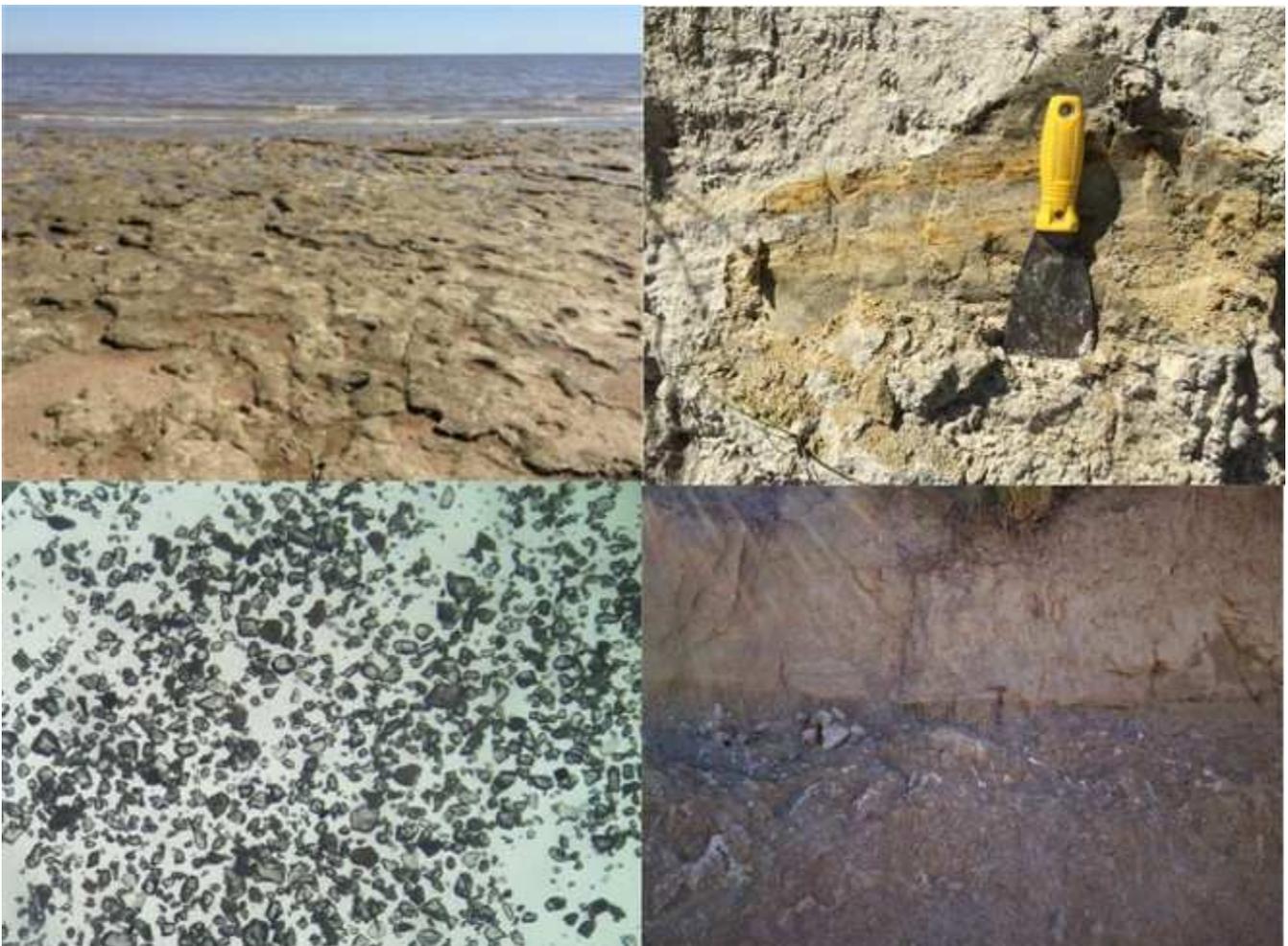


Caracterización sedimentológica e hidráulica de la Formación Raigón (Plioceno) en la región suroccidental del departamento de San José, Uruguay

Trabajo final para la Licenciatura en Geología



Autor: Gonzalo Bango

Tutora: Karina Pamoukaghlian

Cotutor: Marcos Musso

Índice

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| Resumen:..... | 6 |
| 1- Introducción..... | 7 |
| 2- Objetivos..... | 9 |
| 3- Antecedentes..... | 9 |
| 3.1- Antecedentes geológicos:..... | 9 |
| 3.2- Antecedentes hidrogeológicos..... | 17 |
| 4- Metodología..... | 19 |
| 5- Resultados..... | 26 |
| 5.1- Análisis granulométrico..... | 30 |
| 5.2- Propiedades Índice..... | 32 |
| 5.3- Descripción de muestras en lupa y microscopio..... | 34 |
| 5.4- Perfiles estratigráficos..... | 38 |
| 5.5- Cortes geológicos..... | 42 |
| 6- Discusión..... | 46 |
| 7- Conclusiones y recomendaciones..... | 49 |
| 8- Referencias bibliográficas..... | 51 |
| Anexo I: datos de pozos (DINAGUA)..... | 54 |
| Anexo II: datos de ensayos..... | 60 |

Lista de Figuras

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Mapa esquemático de la zona de estudio con principales arroyos y camino. Sistema de coordenadas planas, proyección Mercator transversal, elipsoide Hayford (1924), Datum Yacaré..... | 8 |
| Figura 2: Mapa geológico del área de estudio (Convenio de Cooperación DINAMIGE - Facultad de Ciencias (2004))..... | 10 |
| Figura 3: Secciones estratigráficas costeras. A: Punta Gorda (departamento de Colonia, coordenadas; 259600, 6245100). B: San Juan (departamento de Colonia, coordenadas: 299200, 6204000). C: Arazatí (departamento de San José, coordenadas: 389500, 6176600). (Martinez 1994)..... | 12 |
| Figura 4: Modelo numérico de piezometría del SAR (De los Santos et al., 2013) y zona de estudio..... | 18 |
| Figura 5: 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)..... | 19 |
| Figura 6: (izquierda) Ejemplo de curva granulométrica con D60 y D10 resaltados, (derecha) determinación de densidad por método del parafinado..... | 21 |
| Figura 7: Principales formas que pueden adquirir los clastos (modificado de Tucker, 2003) | 22 |
| Figura 8: Distintos grados de angulosidad para partículas de baja y alta esfericidad (modificado de Tucker, 2003)..... | 22 |
| Figura 9: Vista de ensayo de la separación de la fracción limo (entre 10 y 30 micrómetros de diámetro)..... | 23 |
| Figura 10: Ensayos de conductividad hidráulica para sedimentos gruesos (izquierda) y para sedimentos finos (derecha)..... | 24 |
| Figura 11: Localización de sitios de extracción de muestras y levantamiento de perfiles.. | 26 |
| Figura 12: vista panorámica de la barranca costera de Arazatí (sitio 3)..... | 27 |
| Figura 13: vista panorámica de la barranca costera de Arazatí (sitio 4)..... | 28 |
| Figura 14 : columna estratigráfica para el sitio 11..... | 29 |
| Figura 15: vista panorámica de la barranca costera de Arazatí (sitio 14)..... | 29 |
| Figura 16: curvas granulométricas acumulativas..... | 30 |
| Figura 17: histogramas de distribución granulométrica para muestras del sitio 3..... | 30 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 18: histogramas de distribución granulométrica para muestras del sitio 4 (arriba) y para muestras de los sitios 11 y 14 (abajo)..... | 31 |
| Figura 19: Ensayos de conductividad hidráulica..... | 33 |
| Figura A, B: muestra s3m3 en lupa y en microscopio respectivamente..... | 36 |
| Figura C, D: muestra s3m2 en lupa..... | 36 |
| Figura E, F: muestra s4m3 en lupa..... | 36 |
| Figura G: muestra s3m4 en lupa..... | 36 |
| Figuras H, I: muestra s4m1 en lupa..... | 37 |
| | 37 |
| Figuras J, K: muestra s4m2 en lupa..... | 37 |
| Figuras L, N: Microfotografía con PP de la muestra s11m2..... | 37 |
| Figuras L, N: Microfotografía con PP de la muestra s11m2..... | 37 |
| Figuras M y O: Microfotografía con PC de la muestra s11m2..... | 37 |
| Microfotografía con PC de la muestra s11m2..... | 37 |
| Figura 20: perfiles estratigráficos de las barrancas costeras de los sitios 11 y 4 (s11 y s4 de la Figura 12)..... | 38 |
| Figura 21: perfiles estratigráficos de las barrancas costeras de los sitios 2 y 3 (s2 y s3 de la Figura 12)..... | 39 |
| Figura 22: perfiles estratigráficos de las barrancas costeras de los sitios 12 y 14 (s12 y s14 de la Figura 12)..... | 40 |
| Figura 23: correlación de perfiles estratigráficos..... | 41 |
| Figura 24: zona de estudio con localización de pozos y cortes geológicos..... | 42 |
| Figura 25a: Cortes geológicos 1 al 3..... | 43 |
| Figura 25b: Corte geológico 4 y leyenda..... | 44 |
| Figura 26: Bloques diagrama que incluyen todos los cortes en perspectiva..... | 45 |
| Figura 27: Secuencia de canal abandonado según Coleman y Prior, 1980, en Arche (1992)..... | 47 |
| Figura 28: 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 centra de la llanura intermareal de la Ensenada de San Simón, Ría de Vigo. (Vilas, 1992)..... | 48 |

Lista de Tablas

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla1: El Cuaternario marino y continental de Uruguay. Algunas propuestas de unidades y posibles correlaciones. (Modificado de Martínez et al.. 2001)..... | 16 |
| Tabla2: Unidades litoestratigráficas del neógeno Argentino (Tófaló 2005). La formación Puelches se correlaciona con la Fm Raigón de Uruguay..... | 16 |
| Tabla 3: Resumen de propiedades índice determinadas para cada muestra..... | 32 |

Lista de siglas

ASTM: American Society for Testing and Materials

D₆₀ y D₁₀: 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.

DINAGUA: Dirección Nacional de Aguas

DINAMIGE: Dirección Nacional de Minería y Geología

Fm: Formación

SAR: Sistema Acuífero Raigón

SxMy: Muestra “y” del sitio “x”

PP: Polarizadores paralelos.

PC: Polarizadores cruzados.

Resumen:

La Formación Raigón es una unidad geológica de edad pliocénica, compuesta por arenas y areniscas subarcósicas a cuarzosas como grupo litológico predominante. Compone el reservorio de agua subterránea con mayores volúmenes de extracción para uso agrícola, industrial y doméstico del país, y también es una importante reserva de áridos para uso como material de construcción en obras civiles. En este trabajo se realiza un estudio sedimentológico y de conductividad hidráulica de la Formación Raigón, al suroeste del departamento de San José, con el fin de contribuir a su conocimiento científico, y al aprovechamiento y mejor administración de los recursos vinculados a dicha formación.

Para lograr estos objetivos se procesaron datos existentes de información de pozos provistos por la DINAGUA, y se generaron datos nuevos a partir del levantamiento de perfiles estratigráficos sobre las barrancas costeras. Además se llevaron a cabo ensayos de granulometría, densidad de partículas sólidas, porosidad, observación con lupa y microscopio, y ensayos de conductividad hidráulica.

Los resultados obtenidos coinciden en gran parte con la información de los antecedentes. 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, se evidencia en la mayoría de los pozos un nivel arcilloso (y a veces más de uno) que separa los niveles arenosos que componen el acuífero. 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.

En las barrancas costeras, se observa una sucesión arenosa grano y estrato-decrecientes con continuidad lateral evidenciada a lo largo de 4,2 km de costa. La composición mineralógica de la fracción arenosa es subarcósica para tamaños de arena gruesa a media, gradando a predominantemente cuarzosa para granulometrías más finas. Los clastos observados son subredondeados a angulosos. En algunas muestras se evidenció mayor concentración de cemento carbonático que otorga mayor cohesión y menor porosidad a las muestras.

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

1- Introducción

El presente trabajo consiste en hacer un estudio sedimentológico, estratigráfico, y de la porosidad y conductividad hidráulica de la formación Raigón en el suroeste del departamento de San José (**Figura 1**). La geología del Cenozoico uruguayo presenta una serie de desafíos para su estudio, principalmente debido a su poca exposición en superficie o en cortes, ya que las formaciones geológicas de esta era suelen presentar cobertura edáfica y vegetal casi en la totalidad de su extensión. A su vez, estas formaciones constituyen una fuente importante de recursos minerales e hídricos (ej. áridos y aguas subterráneas) (Spoturno et al., 2004). Muchas de estas formaciones se encuentran en la base de diversas construcciones y obras civiles, por lo que sería importante conocer cuál es su comportamiento geomecánico e hidráulico al someterlas a distintas condiciones. La Formación Raigón es una unidad de edad pliocénica, constituida principalmente por arenas gruesas y conglomerádicas de composición cuarzosa a sub-arcósica. Forma parte de los depósitos de la Cuenca del Santa Lucía, y constituye uno de los principales acuíferos del sur del territorio uruguayo.

Localización:

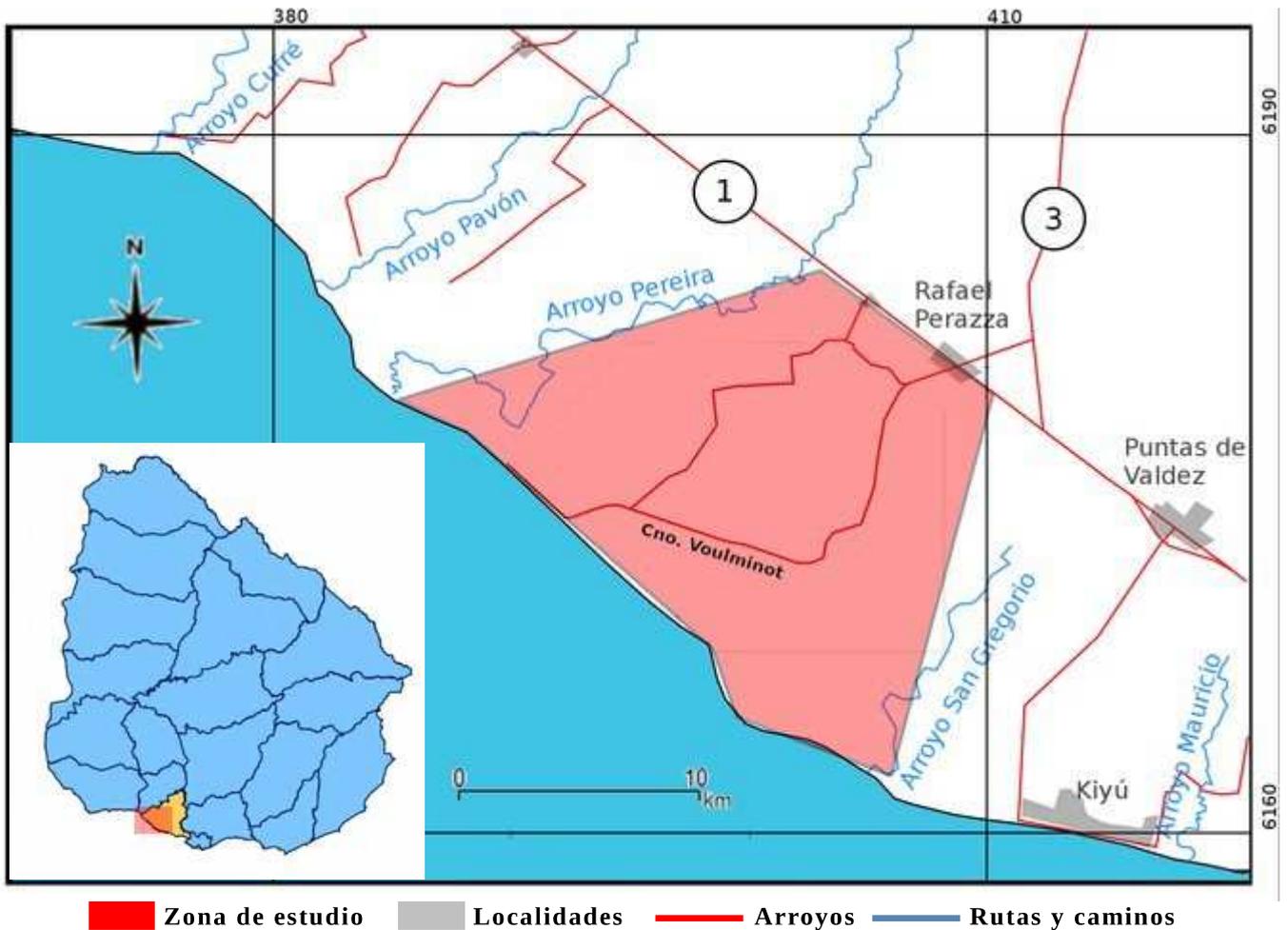


Figura 1: Mapa esquemático de la zona de estudio con principales arroyos y camino. Sistema de coordenadas planas, proyección Mercator transversal, elipsoide Hayford (1924), Datum Yacaré.

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. 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.

2- Objetivos

Objetivo general:

-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.

3- Antecedentes

3.1- Antecedentes geológicos:

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 lugar a la formación de las cuencas de Santa Lucía y Laguna Merín, así como también a 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**).

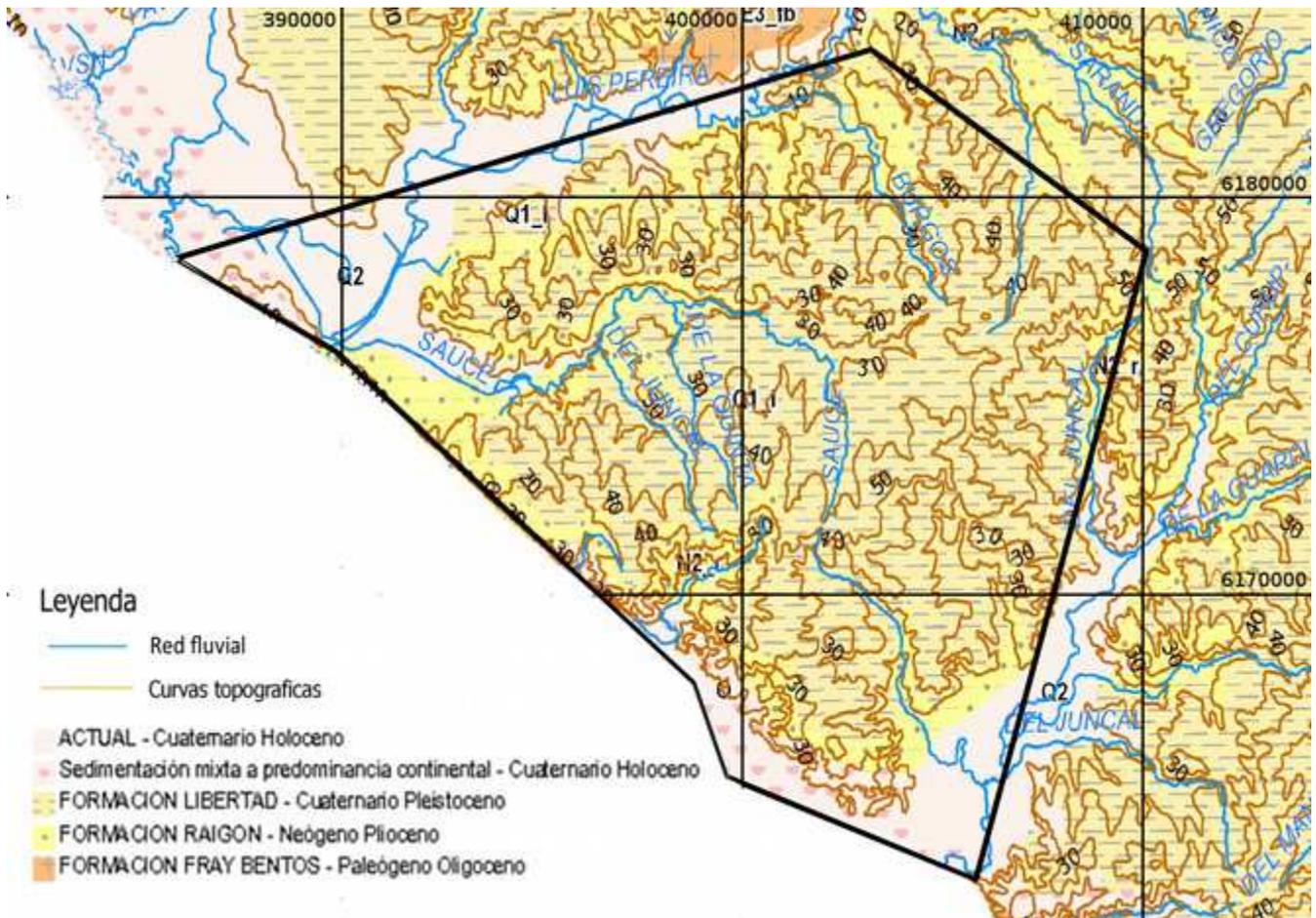


Figura 2: Mapa geológico del área de estudio (Convenio de Cooperación DINAMIGE - Facultad de Ciencias (2004))

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, Chuy, Dolores, Villa Soriano; y depósitos recientes en las playas y en las planicies de inundación de los cursos de agua

-Formación Fray Bentos

Esta formación de edad oligocénica fue definida por Goso (1965), se compone de areniscas finas a muy finas, cuarzo feldespáticas, subangulosas, matriz limo arcillosa, con cemento calcáreo y ocasionalmente silíceo, siendo su color general el pardo amarronado a pardo rosáceo. Algunos autores aseguran que esta formación puede incluir trazas vítreas en su composición (Ubilla, 2004). En general se la encuentra depositada en discordancia encima de depósitos de edad cretácica o del basamento cristalino. Por encima de esta formación pueden encontrarse depósitos miocénicos, pliocénicos y pleistocénicos.

En el departamento de San José, aflora en los márgenes del Arroyo de la Virgen, y en la confluencia del Arroyo Sarandí con el Río San José, y del Arroyo Cagancha con el Río San José, en algunos desmontes de la Ruta Nacional Nº 1 y en los entalles de una serie de cañadas. Esta unidad, conjuntamente con el basamento cristalino desarrolla las zonas de mayor cota altimétrica en el área.

-Formación Camacho

Definida por Caorsi & Goñi (1958) como "Areniscas de Camacho", toman su nombre del propietario de la cantera donde se hizo la primera descripción litoestratigráfica de esta formación.

Reúne una sucesión de areniscas desde muy finas a gruesas, limolitas y pelitas arcillosas. Se caracteriza por presentar un abundante contenido fósil, y aflora principalmente en las costas de los departamentos de San José y Colonia. Martínez (1994) separa esta formación en dos miembros con características disímiles: el miembro San Pedro, caracterizado por el dominio de depósitos limo-arenosos y limolíticos bioturbados; y el miembro Cerro Bautista, distinguido por la presencia de areniscas finas a muy finas, blancas, junto con niveles integrados por fracciones más gruesas, como se ilustra en la figura 3.

En análisis de perforaciones, se han encontrado sedimentitas de la Formación Camacho, con espesores promedios de 20m y algunas excepciones en las que supera los 25m, tanto en su facies arenoso como arcilloso. En la plataforma continental este espesor puede alcanzar los 200m de acuerdo a la interpretación de los pozos de Gaviotín y Lobo (Stoakes et al., 1991; de Santa Ana & Ucha 1994).

Esta unidad presenta litologías asociadas a un ambiente marino a marino litoral, costero, de playa (Sprechmann 1974, Martínez 1994).

Las relaciones de contacto de la Formación Camacho, son discordantes hacia su base con la Formación Fray Bentos, y podría llegar a existir un pasaje gradual hacia las litologías de la Formación Raigón (Bessouat et al., 2000).

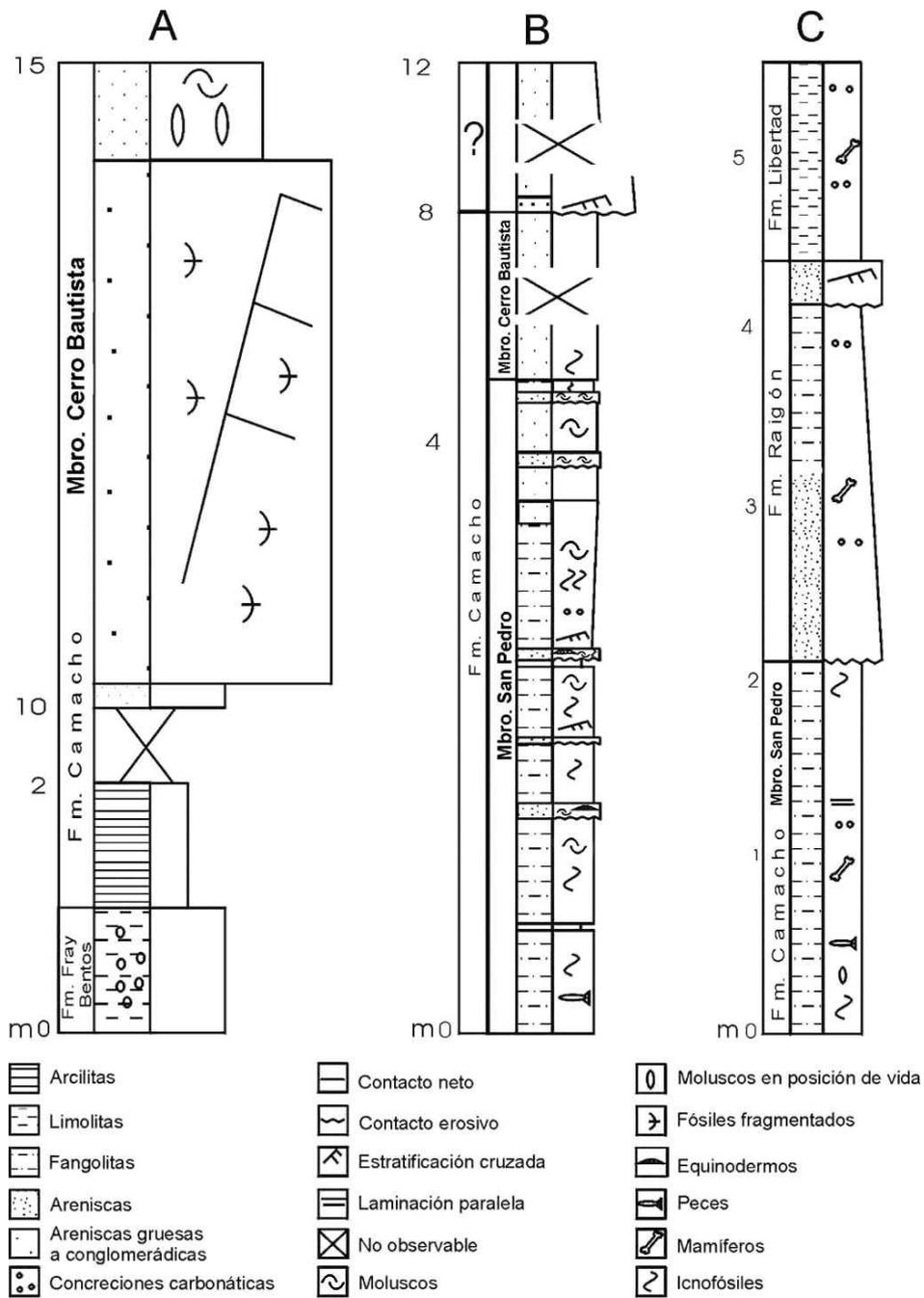


Figura 3: Secciones estratigráficas costeras. A: Punta Gorda (departamento de Colonia, coordenadas: 259600, 6245100). B: San Juan (departamento de Colonia, coordenadas: 299200, 6204000). C: Arazatí (departamento de San José, coordenadas: 389500, 6176600). (Martínez 1994)

-Formación Raigón

La Formación Raigón, definida por Goso (1965), está 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. En 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 interdigitados y groseramente rítmicamente, 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 clastos con morfología subangulosa a subredondeada (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. Ortiz (2011) incluye en el tope de la Formación Raigón un nivel de *loess* anaranjado tenaz, considerado por autores precedentes como perteneciente a la Formación Libertad.

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

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.

-Formación Libertad

Esta formación, definida por Goso (1965), está constituida por limos arcillosos y *loess*, pardos amarronados. 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 esta constituida por lodolitas masivas, limos arcillosos marrones a pardo amarronados, con un bajo porcentaje de arena gruesa y algo de gravilla, dispersa en la matriz. Dentro de estas litologías predominan los limos pardo amarronados, 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 25m 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.

-Formación Chuy

La Formación Chuy según Goñi & Hoffstetter (1964) se definió como: "Arenas cuarzosas, amarillo rojizas, semi-consolidadas, formada por granos bien redondeados, pulidos y a veces de brillo mate, de diámetro medio de 0,10 a 0,18 mm, muy bien clasificados. Ocasionalmente se presentan nódulos ferruginosos o costras incipientes. La arena posee minerales pesados: zircón, turmalina, biotita, rutilo, granate, andalucita, hornblenda, epidoto y actinolita; tiene los granos usualmente recubiertos por película ferruginosa."

Goso (1972) le asigna una edad pleistocénica a esta formación y Preciozzi et al., (1985) incluyen, además de las arenas, entre otras, litologías arcillo-gravillosas y arcillas.

-Formación Villa Soriano

Fue definida por Goso (1972). Se encuentra aflorando en una banda estrecha a lo largo de todo el litoral uruguayo. Está asociada a la desembocadura de los cursos de agua en el Río de la Plata, y en algunos casos, a los cursos medio de los mismos. Desarrolla las planicies a las cotas más bajas cartografiada, estando muchas veces recubierta por sedimentos de edad reciente, generando grandes zonas de bañados. Litológicamente está constituida por arenas finas a muy finas mal seleccionadas, con abundante arcilla en la matriz, también en lentes, de colores ocre, grises y gris verdosos. El espesor promedio es de 3m, encontrándose en algunos pozos hasta 5m. Según los fósiles encontrados, y las relaciones estratigráficas, la edad tentativa para esta unidad es Pleistoceno Superior-Holoceno.

Existen evidencias de depósitos de cenizas volcánicas recientes, procedentes de volcanes activos de la cordillera de los Andes (Reckziegel et al., 2016). Al mismo tiempo, existen casos de contaminación de acuíferos con arsénico con origen en depósitos volcanoclásticos en la llanura Chaco-Pampeana (Mañay et al., 2013). Algunos de estos depósitos volcanoclásticos se encuentran incluidos dentro de las Formaciones Puelches y Ensenada en territorio Argentino, ambas formaciones correlacionadas con las Formaciones Raigón y Libertad respectivamente del territorio Uruguayo, como se indica en las tablas 1 y 2 (Tófaló, 2005 y Martínez et al., 2001 respectivamente).

Tabla1: El Cuaternario marino y continental de Uruguay. Algunas propuestas de unidades y posibles correlaciones. (Modificado de Martínez et al., 2001).

| | Goñi & Hoffstetter, 1964 | Goso & Bossi, 1966 | Goso, 1972 | Bossi et al., 1975 | Preciozzi et al., 1985 | Navarro, 1990 | Bossi & Navarro, 1991 | Bossi et al., 1998 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|--------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------------|----------|-----------------|--------------|--------|--------|----------|---------|-----------------|--------|----------|--------|---------|--------|----------|--------------|---|--------|----------|----------|---|--------|----------|----------|---|--------|----------|----------|---|--------|----------|----------|
| HOLOCENO | Post-Arazati | arenas costeras, dunas, turba | Reciente | Reciente | Reciente | Pta. de los Loberos | regresión reciente | limolitas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Vizcaíno | | | Vizcaíno | Villa Soriano | limolitas de Carrasco | limolitas de Carrasco | Rodados del Uruguay, Aluviones, Dunas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PLEISTOCENO | Chuy | Vizcaíno 2 | Villa Soriano | Libertad | Dolores | Dolores | Dolores-Sopas | Dolores | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Arazati | Libertad | Libertad | Las Arenas? | | | | | Las Arenas | Libertad | Chuy II | Chuy III | Barra del Chuy | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Vizcaíno 1 | Las Arenas | Chuy I | Libertad | | | | | | Chuy II | Bellaco-Navarro | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | Salto-Raigón | Salto? | Chuy I | Libertad | Chuy II | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Paso del Puerto | Chuy I | Libertad | Chuy I | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Camacho | Chuy I | Libertad | Salto Raigón | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | Chuy I | Libertad | Libertad | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | Chuy I | Libertad | Libertad | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | Chuy I | Libertad | Libertad | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ? | Chuy I | Libertad | Libertad |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ? | Chuy I | Libertad | Libertad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ? | | | | | Chuy I | Libertad | Libertad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | ? | Chuy I | Libertad | Libertad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | ? | Chuy I | Libertad | Libertad | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Continental
 Marino
 No explicitado

Tabla2: Unidades litoestratigráficas del neógeno Argentino (Tófaló 2005). La formación Puelches se correlaciona con la Fm Raigón de Uruguay.

| | Ameghino (1908) | Frenguelli (1957) | González Bonorino (1965) | Fidalgo (1978) | Yrigoyen (1989, 1993) | Tófaló (2005) |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Holoceno | Ariano Aimara | Aimarenses Cordobenses Platenses Querandineses | Querandino Lujanense | Suelo Pto. Berrondo Fm. Las Escobas Suelo Pto. Callejón Viejo | Delta y prodelta Platense Querandinense Lujanense | Querandino Fm. Luján |
| Pleistoceno | Platense Querandino | Lujanense Bonaerense Belgranense Ensenadense cuspidal Interensenadense Ensenadense basal | Pampeano superior Pampeano medio Pampeano inferior | Fm. Dto. Río Salado Fm. Pascua | Bonaerense Belgranense Ensenadense cuspidal Interensenadense | Fm. Ensenada |
| Plioceno | Lujanense Bonaerense Belgranense Ensenadense Preensenadense | | Arenas Puelches | | Ensenadense basal Puelchense | Fm. Puelches |

3.2- Antecedentes hidrogeológicos

Se define el Sistema Acuífero Raigón (SAR) como el conjunto sedimentario que se desarrolla en la región occidental de la cuenca Santa Lucía, teniendo como base las formaciones Camacho o Fray Bentos y como techo las Formaciones Libertad o Dolores, cuando estas existen (Proyecto RLA/8/031, 2005). Es uno de las principales fuentes de agua subterránea para consumo doméstico, industrial y agrícola. Se ubica al sur del departamento de San José, abarcando una superficie de aproximadamente 1800 km² dentro de la cual se encuentran los pozos de extracción. De acuerdo con datos de DiNaMiGe de junio de 2009, hay 517 pozos que extraen agua del sistema, a una profundidad media de 36,3m y un caudal medio de 23,6 m³/h. El volumen anual extraído es de 6,6 E+07 m³, y representa un 30% del total de agua subterránea extraída en el país. El acuífero consta de depósitos de origen fluvial, donde los paleocauces constituyen zonas de flujo preferencial. (De los Santos, 1998). Los modelos piezométricos realizados a partir de datos de perforaciones (**Figura 4**) indican que la mayoría de los cursos de agua son efluentes con respecto al acuífero, es decir, el sentido del flujo va del acuífero hacia los cursos de agua.

El sistema se subdivide en dos subsistemas (Noreste y Sur) separados por la discontinuidad estratigráfica de la Fm. Raigón generada por el entallado del Río San José. El subsistema Sur a su vez está dividido en tres regiones: oeste, central y este (Informe final del Proyecto RLA/8/031, año 2005).

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) consideran 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 Mm³/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 Mm³/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.

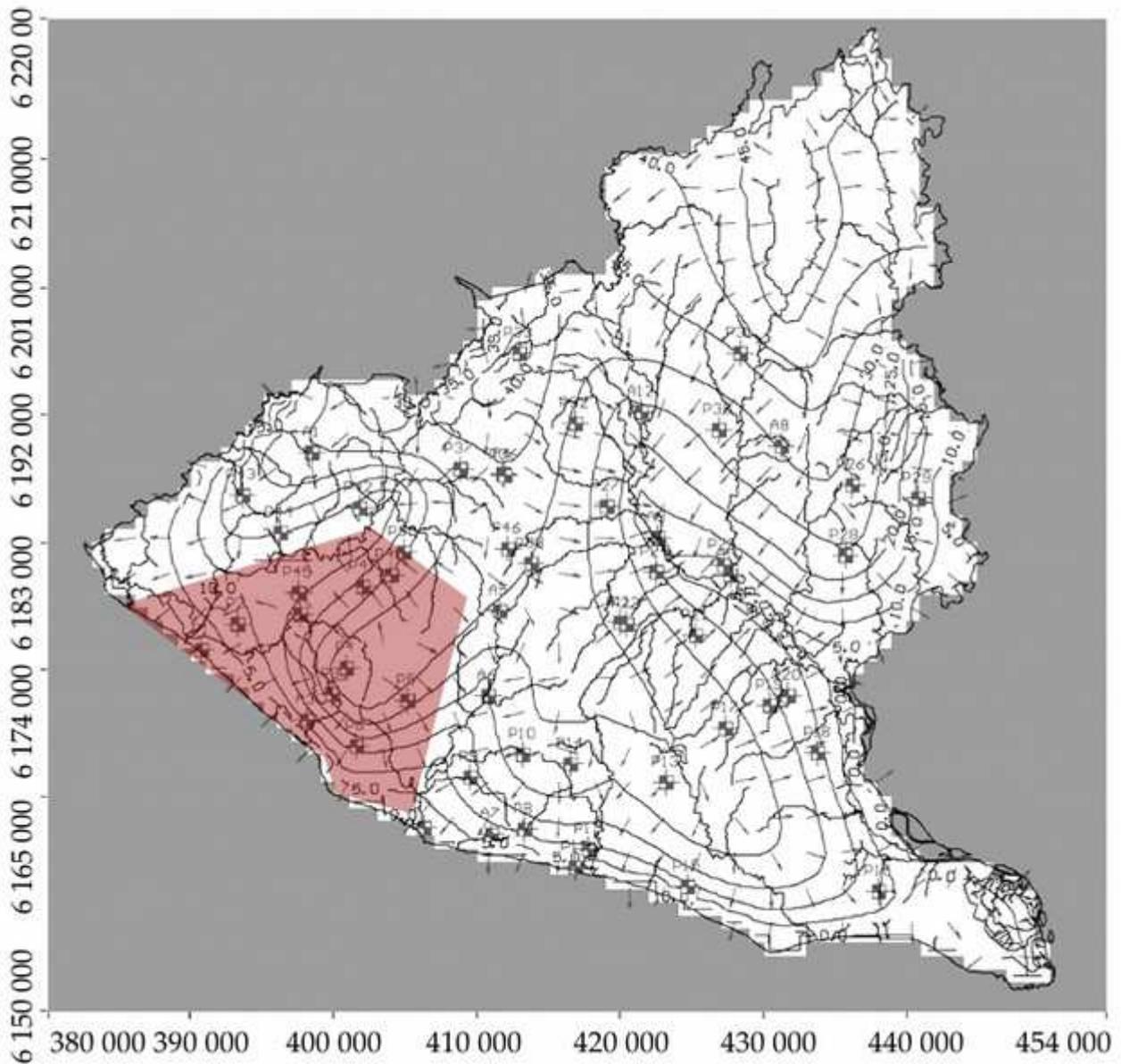


Figura 4: Modelo numérico de piezometría del SAR (De los Santos et al., 2013) y zona de estudio. Coordenadas planas, datum Yacaré.

4- Metodología

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 5), 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.

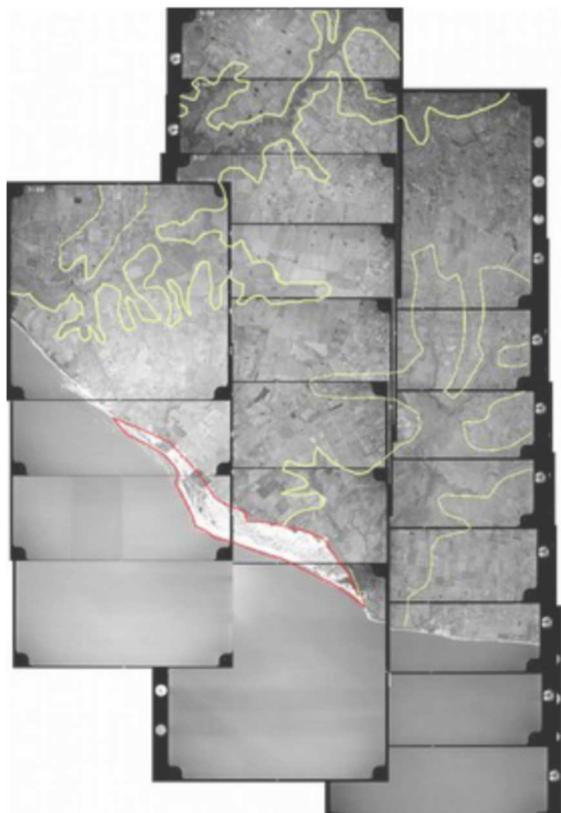


Figura 5: Mosaico de fotos aéreas con unidades fotointerpretadas (Amarillo: planicies de inundación a los márgenes de arroyos y cañadas; Rojo: campo de dunas y arenas recientes)

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.

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 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)

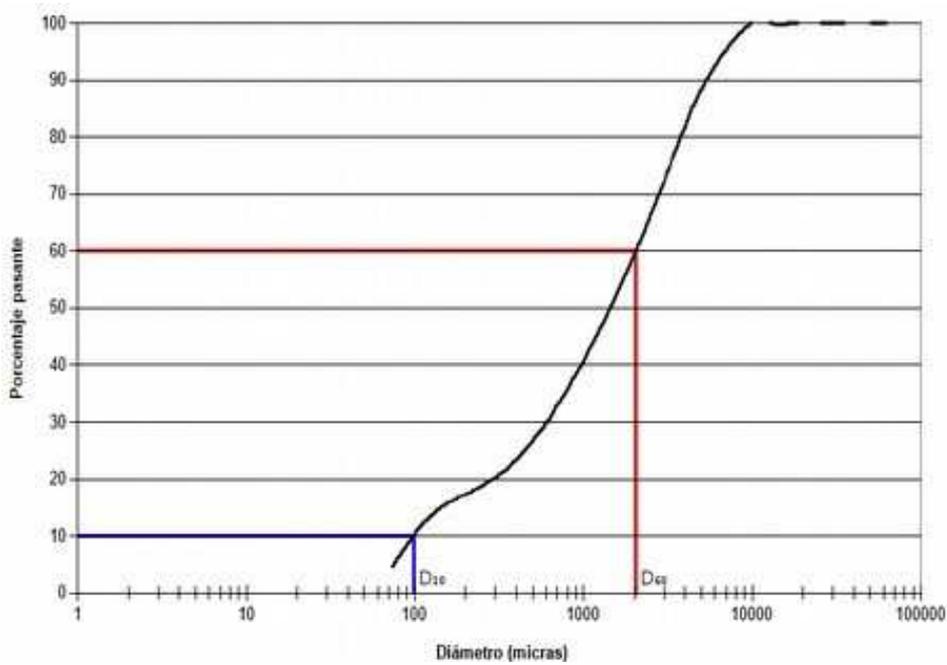


Figura 6: (izquierda) Ejemplo de curva granulométrica con D_{60} y D_{10} resaltados, (derecha) determinación de densidad por método del parafinado.

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) (Figuras 7 y 8).

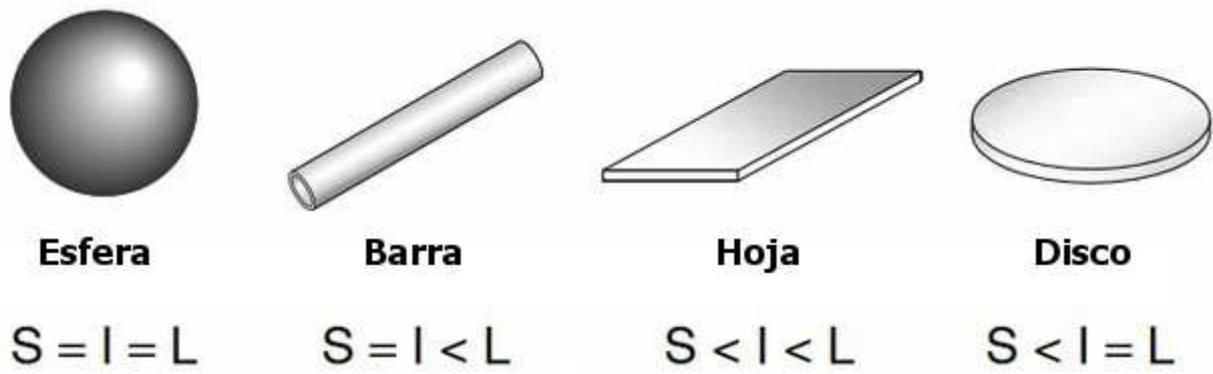


Figura 7: Principales formas que pueden adquirir los clastos (modificado de Tucker, 2003)

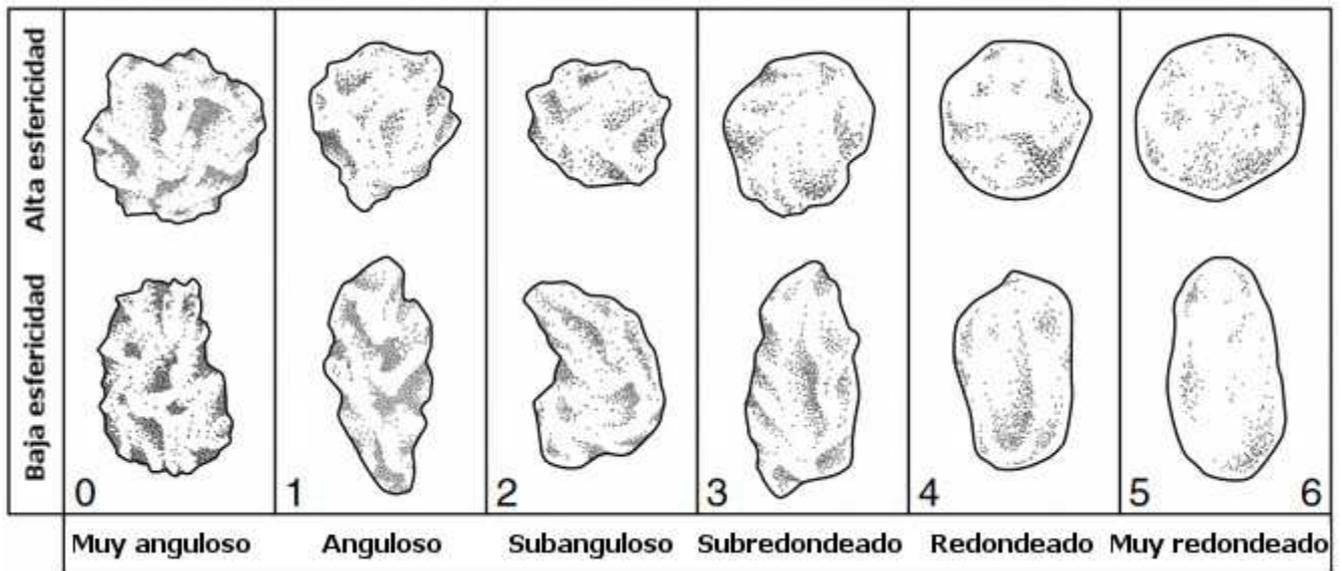


Figura 8: Distintos grados de angulosidad para partículas de baja y alta esfericidad (modificado de Tucker, 2003)

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 9), basándose en la ley de Stokes, cuya fórmula simplificada para la sedimentación de esferas en un fluido con flujo laminar es: $v = \frac{2r^2g(\rho_p - \rho_f)}{9\eta}$, 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).



Figura 9: Vista de ensayo de la separación de la fracción limo (entre 10 y 30 micrómetros de diámetro)

Conductividad hidráulica

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.

Los equipos de laboratorio (**Figura 10**) 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 la distribución de los clastos, la mineralogía, y el grado de saturación del sedimento.

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



Figura 10: Ensayos de conductividad hidráulica para sedimentos gruesos (izquierda) y para sedimentos finos (derecha).

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.

Fase 4:

Se analizaron los datos obtenidos y se organizó la información en gráficos, tablas y diagramas de cortes geológicos.

Se seleccionó la información de pozos provista por la dirección nacional de aguas (DINAGUA), descartando los pozos sin información geológica o con información de mala calidad. La información seleccionada debió ser interpretada para la elaboración de los cortes geológicos.

La información geográfica georrefenciada (camino, red hidrográfica, topografía, localización de pozos de agua, piezometría, y descripción litológica de los pozos) fue incorporada a un sistema de información geográfica, utilizando el *software* de código abierto "Qgis". Utilizando las herramientas de geoprocésamiento del *software* se elaboraron modelos 3D de la estratigrafía con la información de los pozos.

5- Resultados

Se extrajeron muestras de las barrancas costeras, en 4 sitios distintos, en niveles arenosos y arcillosos de la Formación Raigón. La localización de las muestras se detallan en las figuras 11 a 15:



Figura 11: Localización de sitios de extracción de muestras y levantamiento de perfiles. Coordenadas UTM; s11: 390612, 6175422; s4: 391746, 6174302; s2: 392015, 6174061; s3: 392107, 6173974; s12: 393036, 6172992; s14: 393573, 6172430

Sitio "S3":

En la barranca costera se observa un perfil estratigráfico expuesto. La altura de la barranca es de aproximadamente 10,5m. Se observa en la base un nivel más fino, limo-arenoso, en contacto neto con niveles predominantemente arenosos. La unidad arenosa presenta ciclos de depositación estrato y granodecrecientes. El espesor de ambos niveles se mantienen constante hacia ambas direcciones de la barranca. Se recolectaron muestras en los puntos señalados en la figura 12. La barranca del sitio 2 presenta una apariencia similar con una altura un poco menor (aproximadamente 9m), y las secuencias granodecrecientes tienen un espesor mayor a las de la barranca del sitio 3.



Figura 12: vista panorámica de la barranca costera de Arazatí (sitio 3)

Sitio "S4":

La barranca expuesta en este sitio es de aproximadamente 5m de altura. Presenta unidades similares a las descritas en las barrancas 2 y 3. El nivel inferior presenta próximo al contacto con el nivel arenoso, una mayor concentración de concreciones de carbonato de calcio.

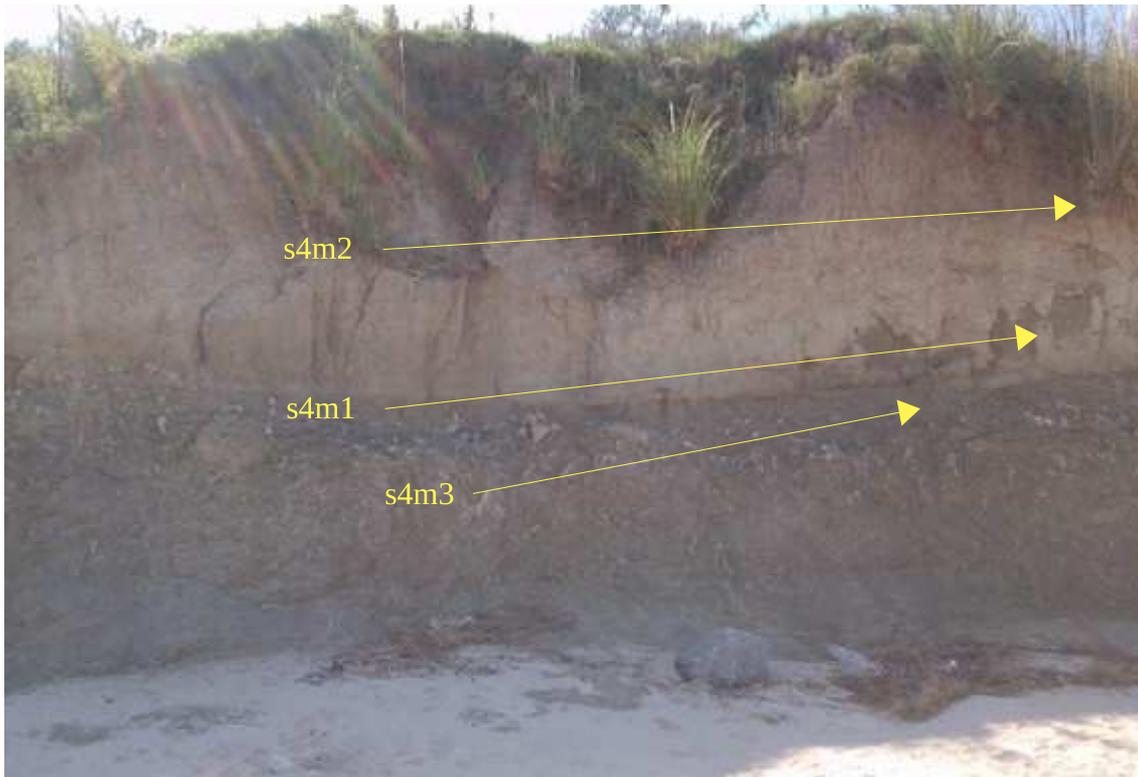
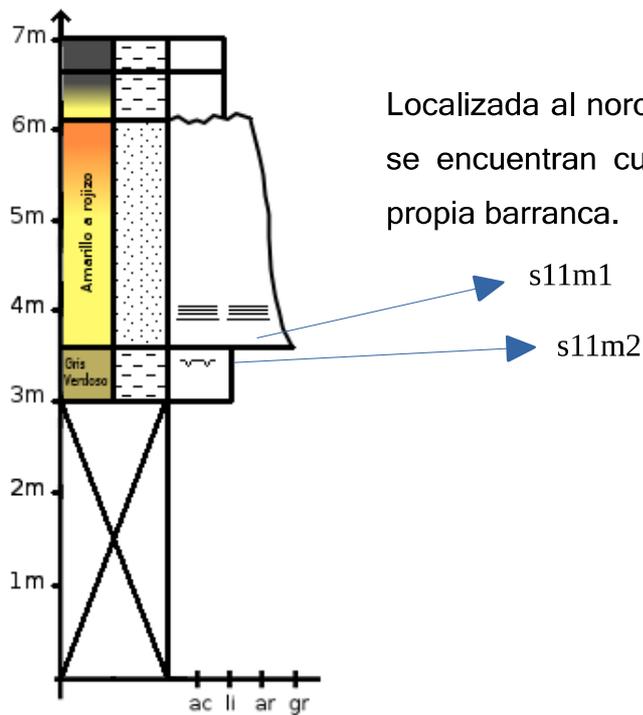


Figura 13: vista panorámica de la barranca costera de Arazatí (sitio 4)

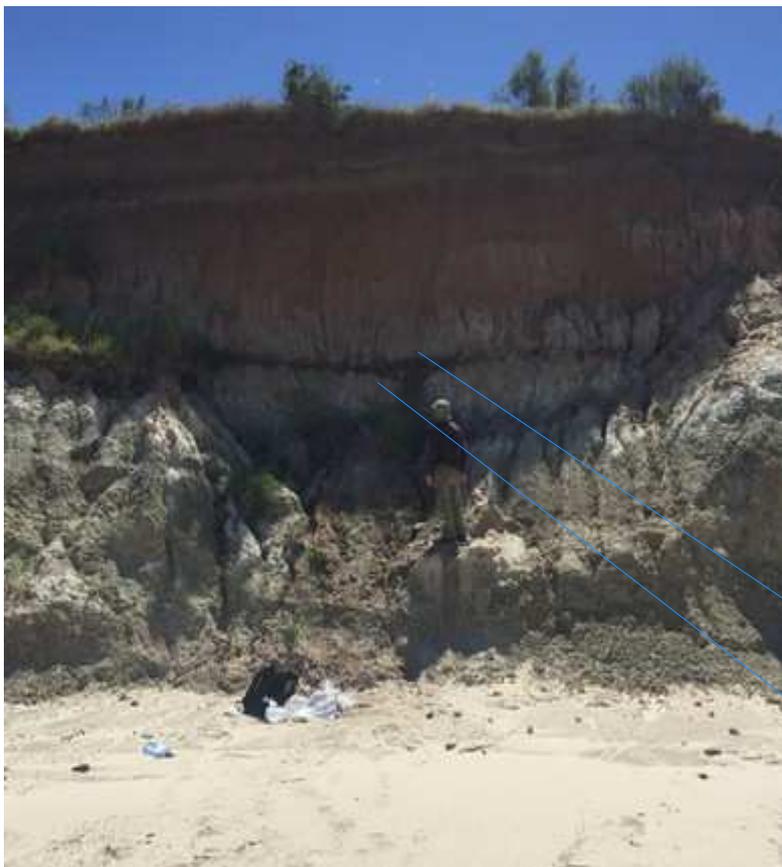
Sitio "S11":



Localizada al noroeste del sitio 4. los primeros 3m de la base se encuentran cubiertos por vegetación y derrumbes de la propia barranca.

Figura 14 : columna estratigráfica para el sitio 11.

Sitio "S14":



Al igual que el sitio 11, presenta cobertura vegetal y de derrumbes en la base de la barranca. Se observa un nivel oscurecido en seguida por encima de los derrumbes en donde se concentra el flujo de agua debido al contraste de permeabilidad en el contacto entre las unidades arenosa y limo-arcillosa.

Figura 15: vista panorámica de la barranca costera de Arazatí (sitio 14)

5.1- Análisis granulométrico

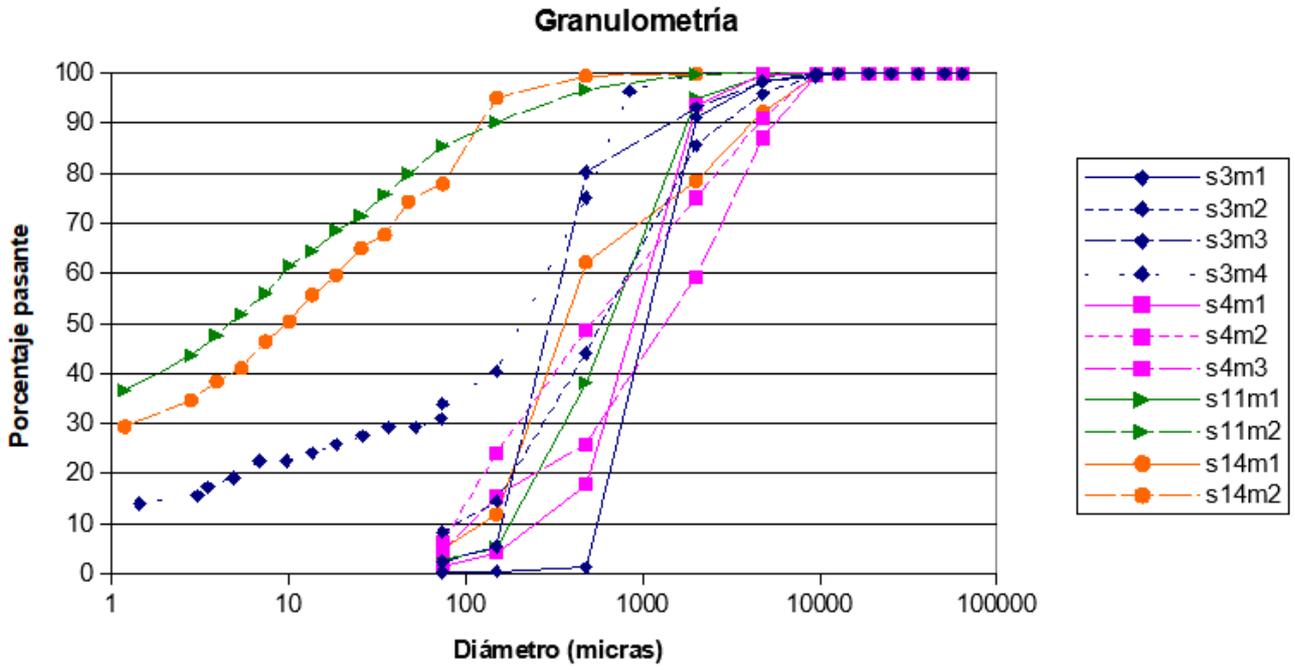


Figura 16: curvas granulométricas acumulativas

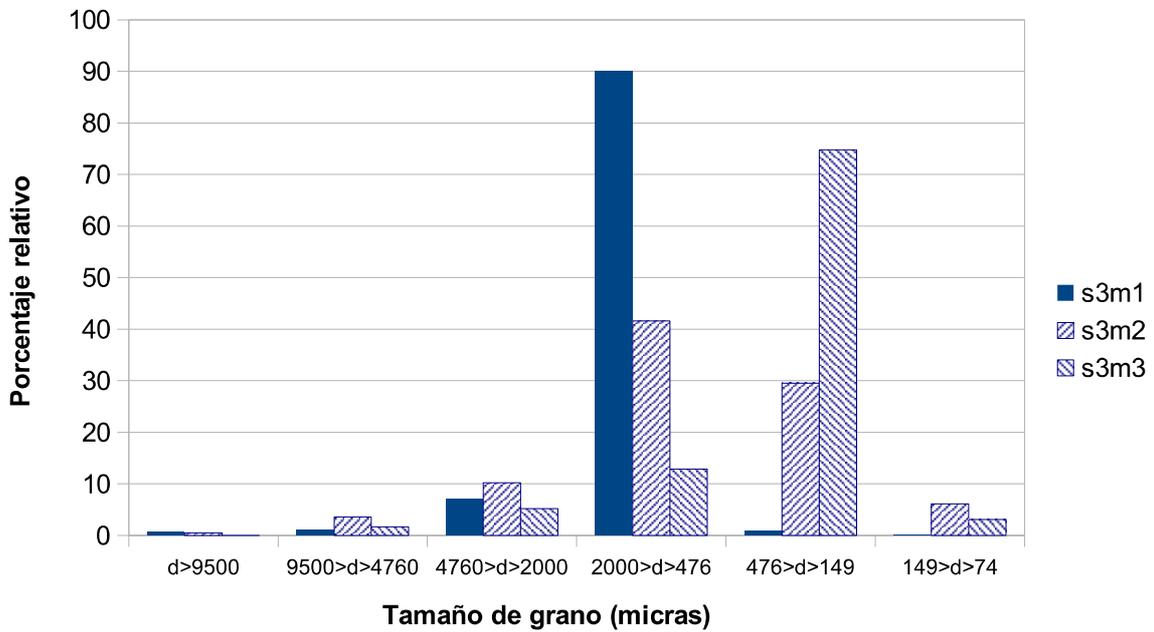


Figura 17: histogramas de distribución granulométrica para muestras del sitio 3

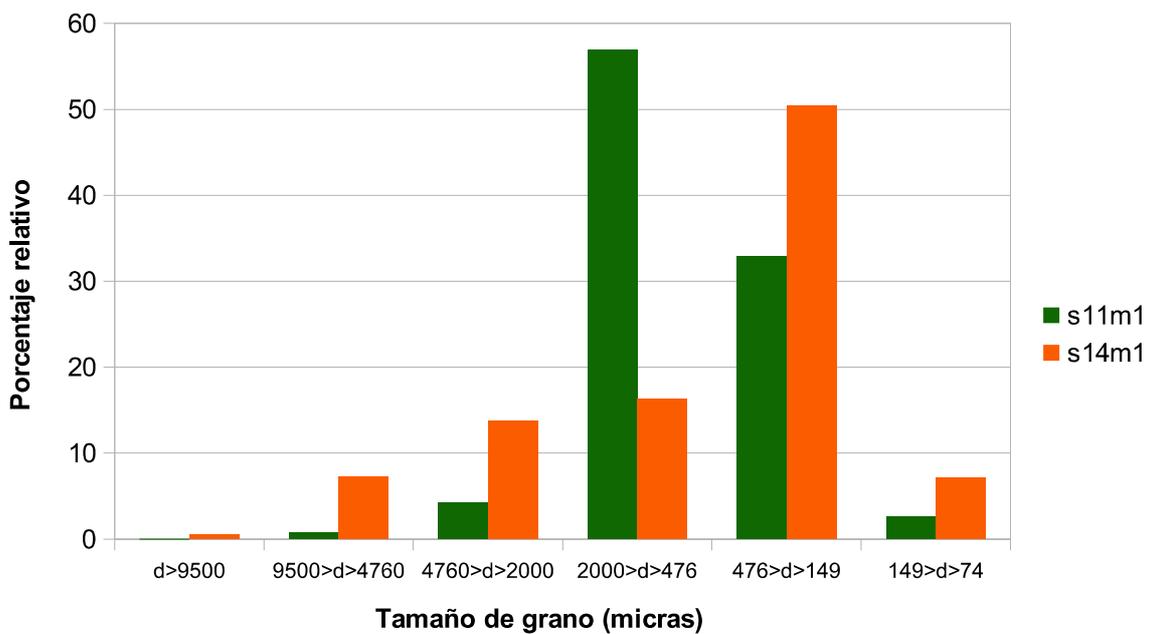
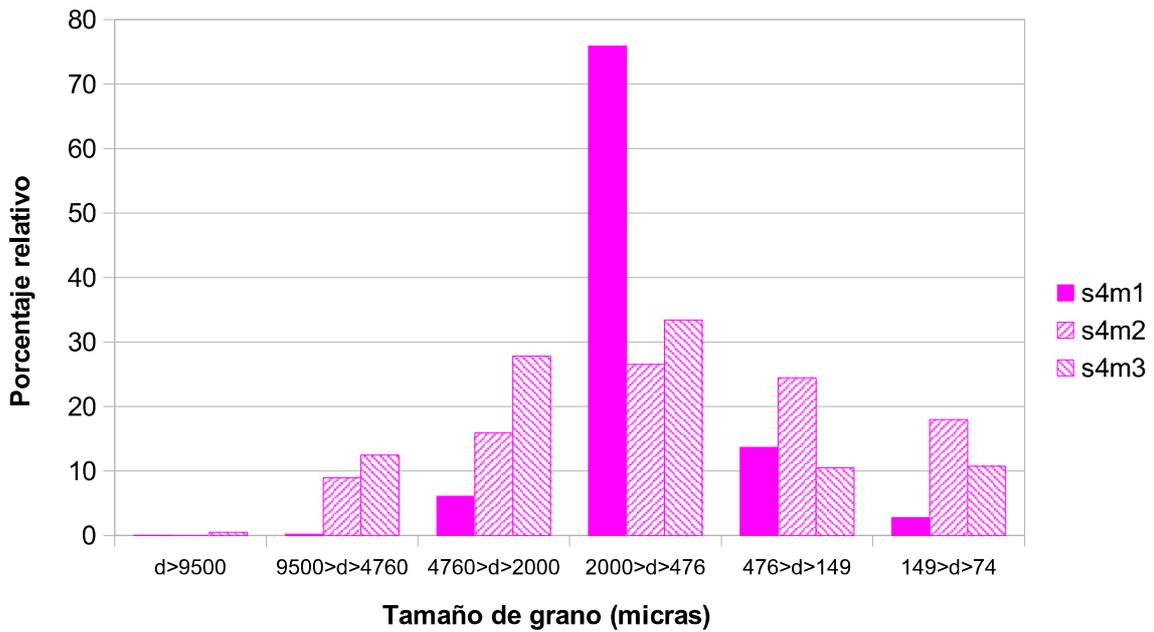


Figura 18: histogramas de distribución granulométrica para muestras del sitio 4 (arriba) y para muestras de los sitios 11 y 14 (abajo)

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%.

5.2- Propiedades Índice

Tabla 3: Resumen de propiedades índice determinadas para cada muestra

| Muestra | Litología | Media (micras) | Desviación estándar | Cu (coeficiente de uniformidad) | Densidad de sólidos (g/cm ³) | Densidad seca (g/cm ³) | Porosidad (%) | Conductividad hidráulica (m/s) |
|---------|----------------------|----------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|---------------|--------------------------------|
| S3M1 | Arena * ¹ | 1541 | 1,18 | 2,22 | 2,70 | s.d. | s.d. | 1,0E-04 |
| S3M2 | Arenisca | 1188 | 1,67 | 9,20 | 2,70 | 1,57 | 42 | |
| S3M3 | Arenisca | 809 | 1,44 | 4,40 | 2,70 | 1,54 | 43 | |
| S3M4 | Arenisca | 194 | 2,70 | s.d. | 2,70 | 1,68 | 38 | |
| S4M1 | Arenisca | 1295 | 1,30 | 4,32 | 2,70 | 1,72 | 36 | |
| S4M2 | Arenisca | 1176 | 2,14 | 10,28 | 2,70 | 1,72 | 36 | |
| S4M3 | Arenisca | 1766 | 2,06 | 19,48 | 2,70 | 1,74 | 36 | |
| S11M1 | Arenisca | 1106 | 1,50 | 6,34 | 2,70 | 1,55 | 43 | |
| S11M2 | Pelita | 45 | 2,54 | s.d. | 2,74 | 1,78 | 35 | 1,0E-09 |
| S14M1 | Arenisca | 1093 | 1,99 | 11,08 | 2,70 | 1,58 | 41 | |
| S14M2 | Pelita | 54 | 2,61 | s.d. | 2,74 | 1,77 | 35 | |

*¹ Se trató de un sedimento sin consolidación que no mantuvo su forma, por lo que se clasificó como "Arena" y no "arenisca"

-Media granulométrica:

La mayoría de las muestras presentan medias granulométricas en el entorno de las 1000 micrómetros (arena media). Las muestras pelíticas arrojaron medias en el entorno de las 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 cuál 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 19. La muestra de sedimentos finos resultó mucho menos permeable que la muestra arenosa analizada.

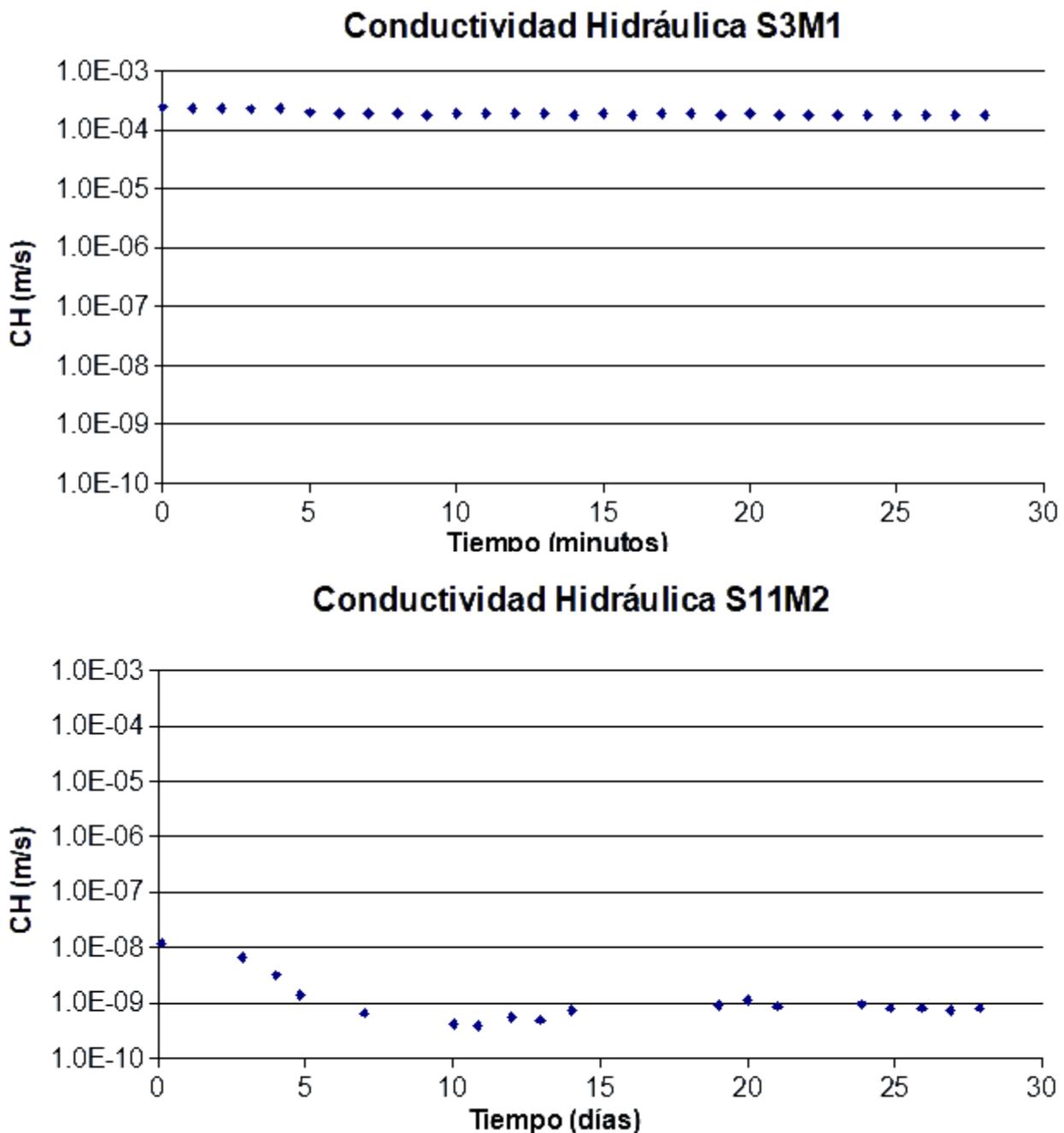


Figura 19: Ensayos de conductividad hidráulica

5.3- Descripción de muestras en lupa y microscopio

S3M2:

Sedimento arenoso-gravilloso, con tamaño de grano que van desde 0,1 mm hasta 3mm. cuarzo feldespático (subarcósico), subangulosos, mal seleccionado. La matriz no llega a representar el 10% de la muestra (arenita feldespática). Los clastos son esféricos a proladados (forma de barra).

S3M3:

Sedimento arenoso, con tamaño de grano medio de 0,3mm, cuarzoso, subanguloso (arenita, subarcósica). En observación en microscopio de un clasto de cuarzo, se puede observar la forma alargada tendiendo a forma de “barra”, y también se observan fracturas concoides en los bordes del grano. Presencia de minerales oscuros (posiblemente ilmenita) que representan alrededor del 1% de la muestra.

S3M4:

Sedimento arenoso, con tamaño de grano medio del esqueleto de 1mm, cuarzoso (subarcósica), anguloso. La matriz fina representa 30% (grauvaca) de la muestra. Se observan algunos clastos rojizos con pátinas de óxido hierro.

S4M1:

Sedimento arenoso-gravilloso, de tamaños de grano que van desde 0,1mm hasta 3mm, cuarzoso (subarcósica), con angulosidad y tamaño de grano del esqueleto similar a S3M4, matriz arenosa fina compone 30% de la muestra (grauvaca).

S4M2:

Sedimento arenoso-gravilloso, con tamaños de grano que van desde 0,1 mm hasta 3mm, cuarzo feldespático (subarcósica), subanguloso, mal seleccionado. La matriz no llega a representar el 10% de muestra (arenita). Los clastos, esféricos con dispersión a formas proladas y obladas,

S4M3:

Sedimento limo-arenoso, clastos visibles de tamaños de 0,1 mm y menores, de composición cuarzo-feldespática (subarcósica). subangulosos. Presenta cementación carbonática abundante (alrededor del 50% de muestra).

S11M2

Selección de fracción limosa (30 μm) de la muestra S11M2 en microscopio con nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha). Se observa una composición mayoritariamente cuarzosa (subarcósica), reflejada en los colores bajos de interferencia y en la morfología de los clastos. Los clastos presentan mayor angulosidad y menor esfericidad que los clastos de tamaño arena observados en lupa. Se aprecia la presencia de algunos minerales opacos prismáticos que no alcanzan a representar el 1% de la muestra.

No se encontraron fragmentos de vitroclastos en ninguna de las muestras analizadas.

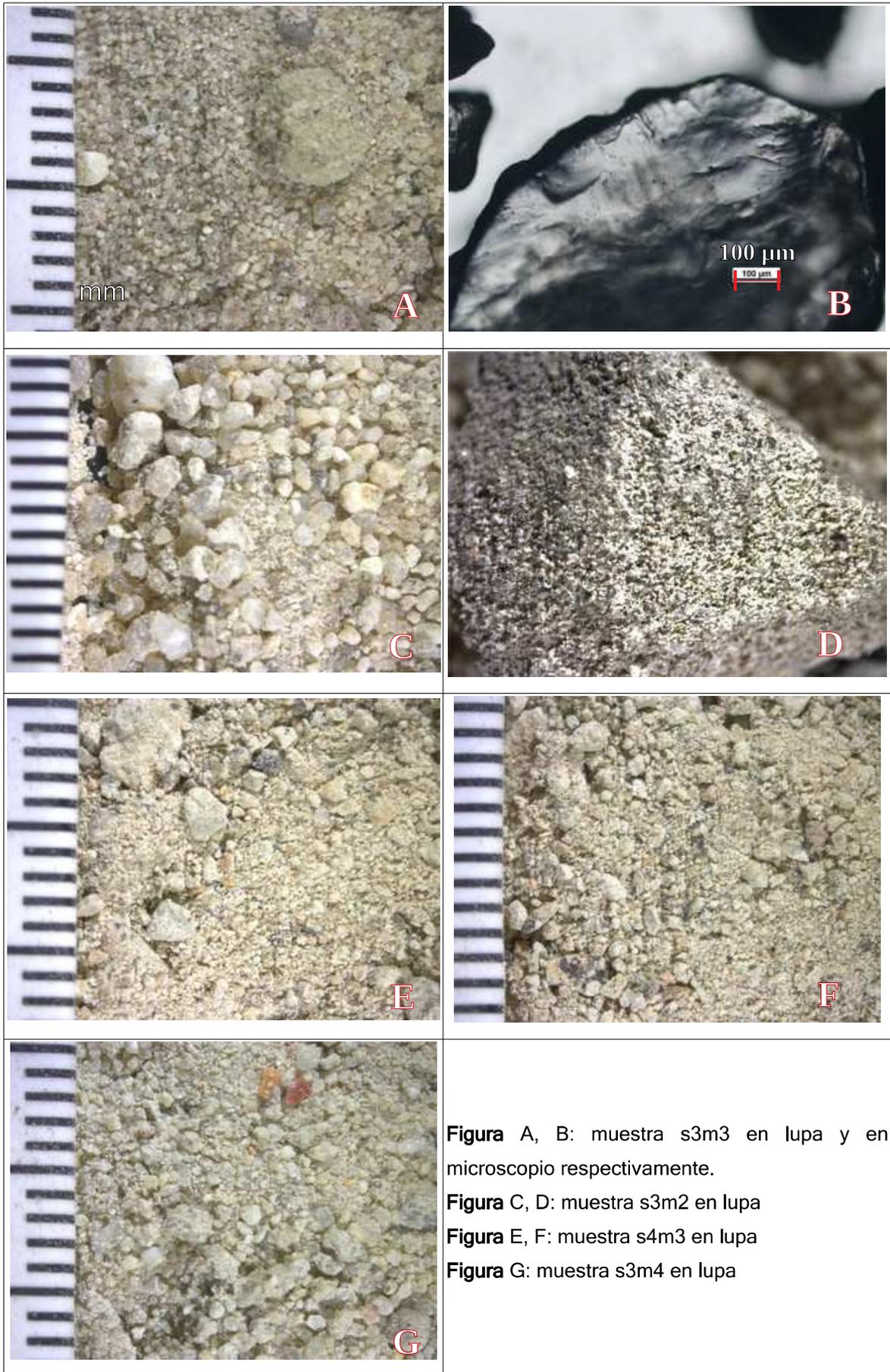
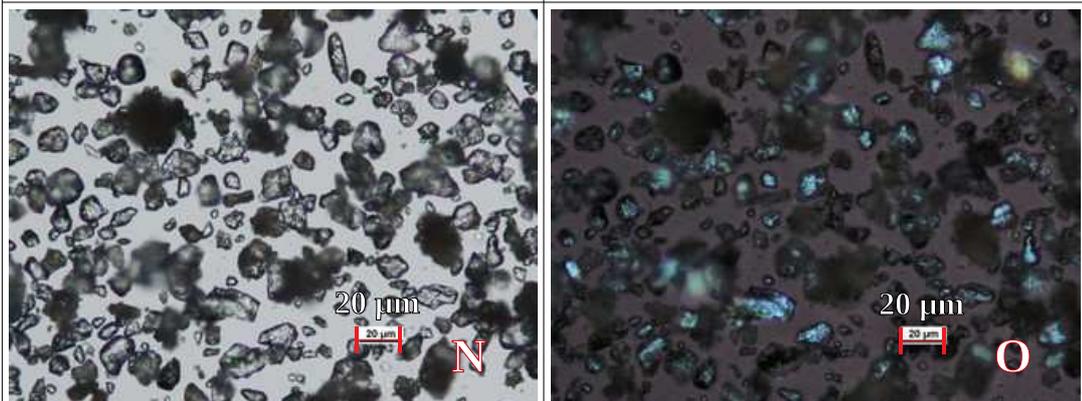
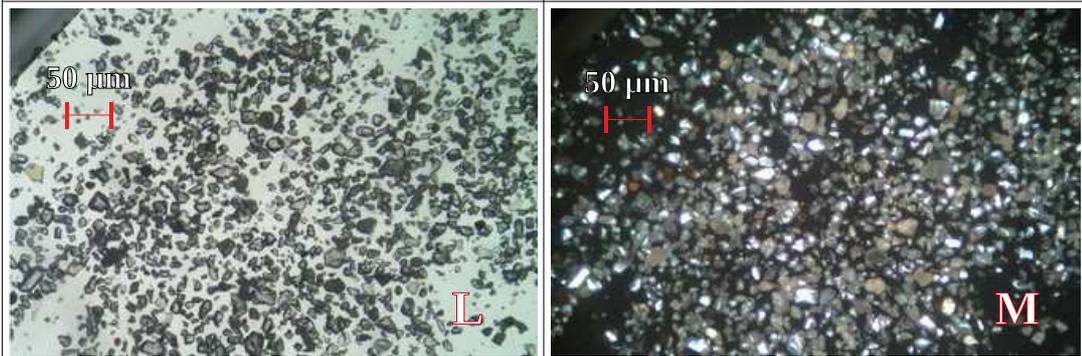
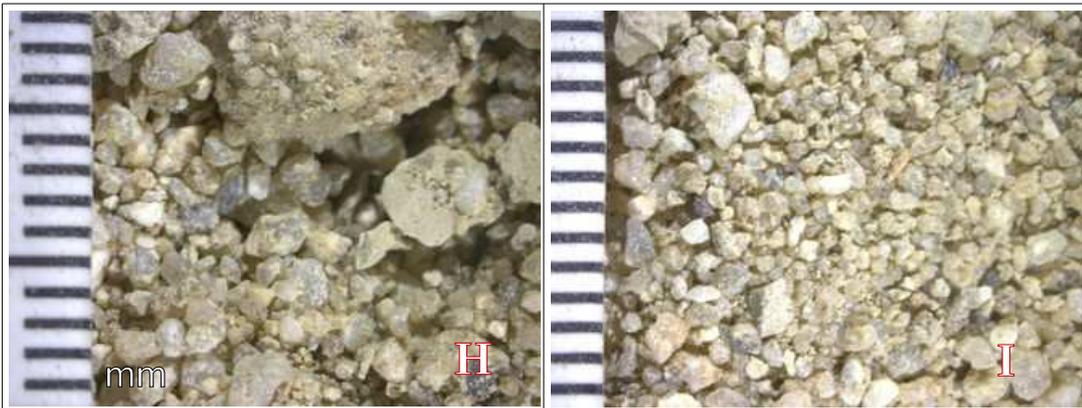


Figura A, B: muestra s3m3 en lupa y en microscopio respectivamente.
Figura C, D: muestra s3m2 en lupa
Figura E, F: muestra s4m3 en lupa
Figura G: muestra s3m4 en lupa



Figuras H, I: muestra s4m1 en lupa

Figuras J, K: muestra s4m2 en lupa

Figuras L, N: Microfotografía con PP de la muestra s11m2

Figuras M y O: Microfotografía con PC de la muestra s11m2

5.4- Perfiles estratigráficos

Se levantaron un total de 6 perfiles estratigráficos a lo largo de las barrancas costeras del balneario Arazatí. Se priorizó identificar litología, texturas y estructuras sedimentarias, y a partir de los perfiles se realizó una correlación de los mismos.

En todas las barrancas se encuentra sobre la base, un nivel limo-arcilloso de color gris verdoso, con estructuras de grietas de desecación. En algunos de los sitios se puede observar una mayor concentración de concreciones de carbonato de calcio, y restos de raíces fosilizadas en este mismo nivel. Por encima de este nivel arcilloso se halla un nivel arenoso de colores amarillentos a rojizos, con estructuras de estratificación plano paralela y cruzada. La secuencia de depositación de estas arenas es grano y estrato-decreciente. Por encima de los depósitos arenosos se halla un nivel limo-arcilloso de colores pardos rojizos que se oscurece hacia la superficie debido al contenido de materia orgánica.

Sitio "S11":

Sitio "S4":

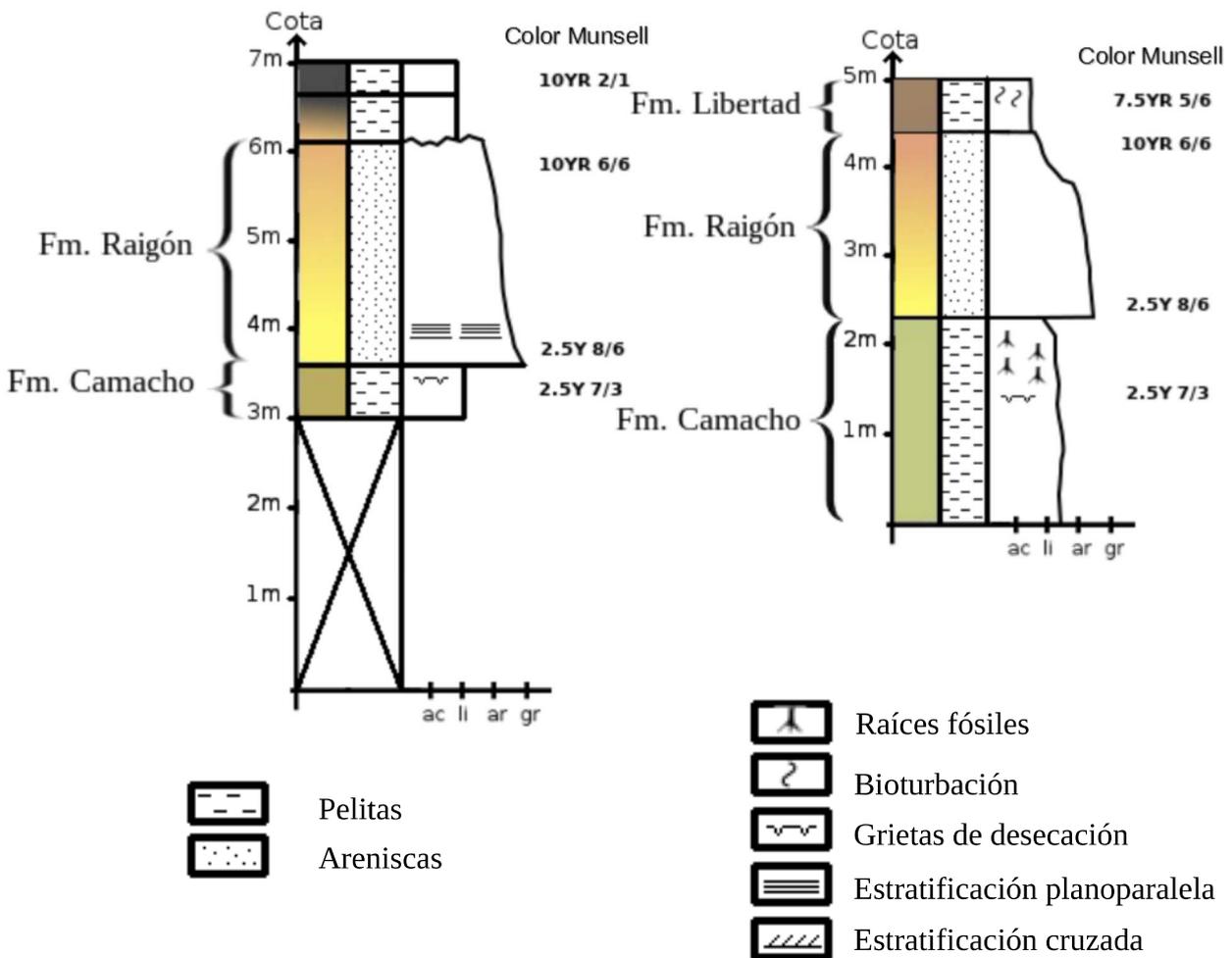


Figura 20: perfiles estratigráficos de las barrancas costeras de los sitios 11 y 4 (s11 y s4 de la Figura 12)

Sitio "S2":

Sitio "S3":

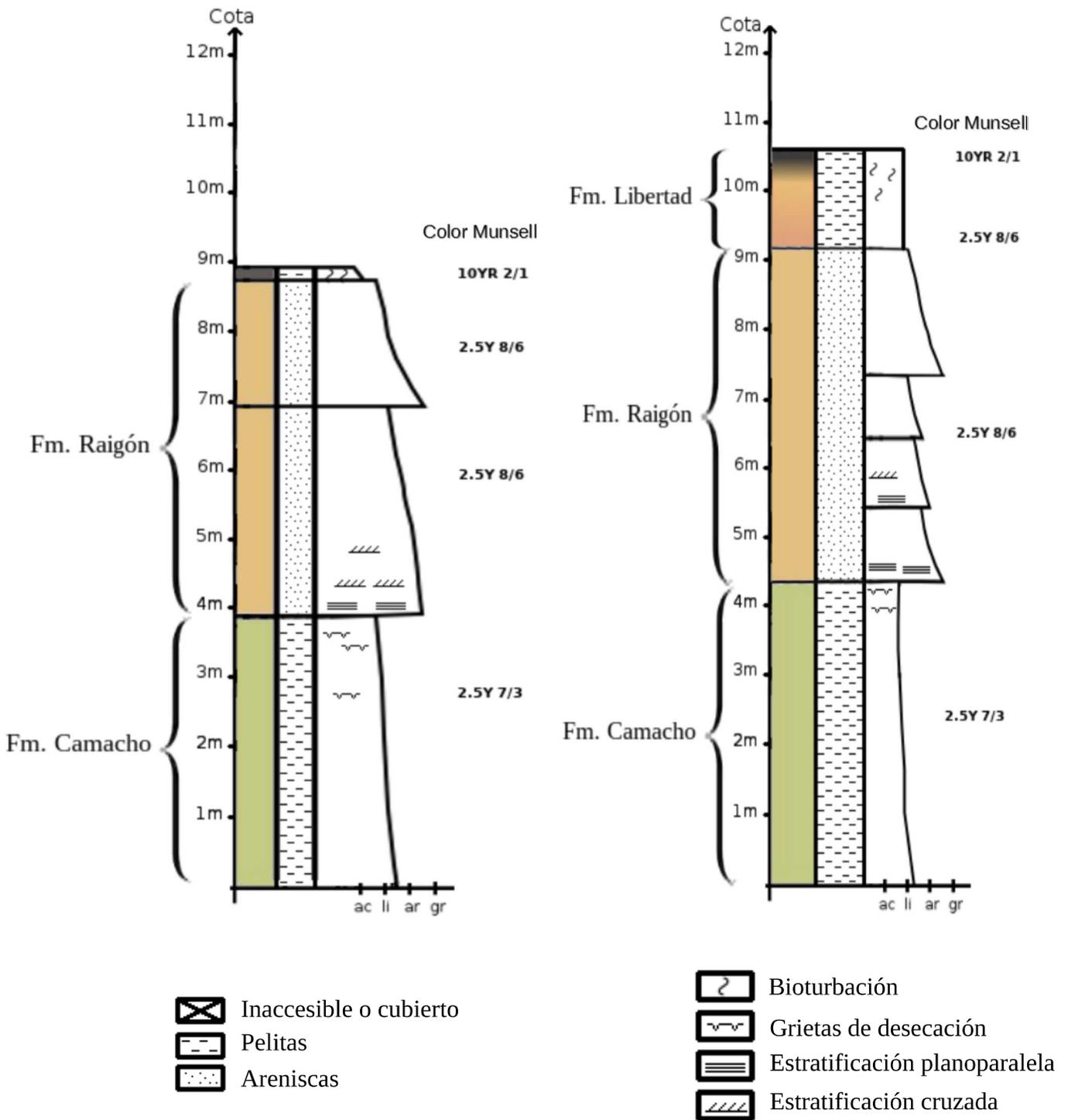
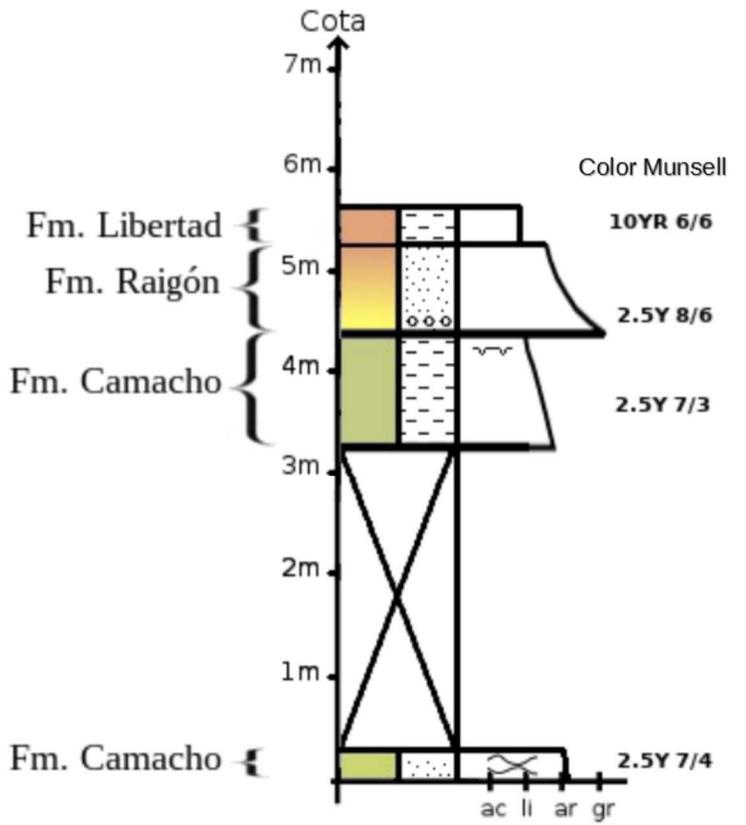
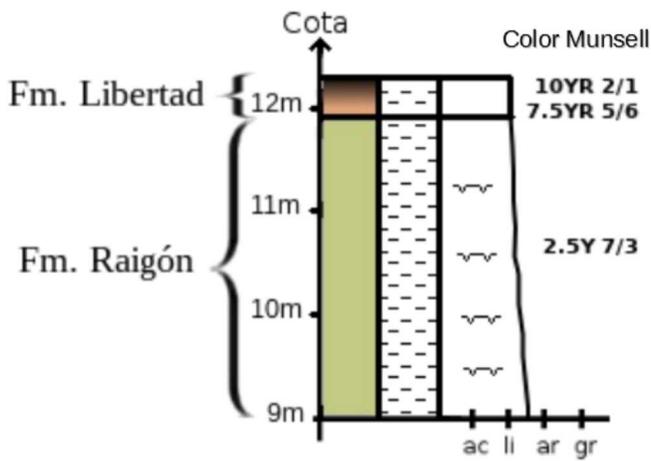


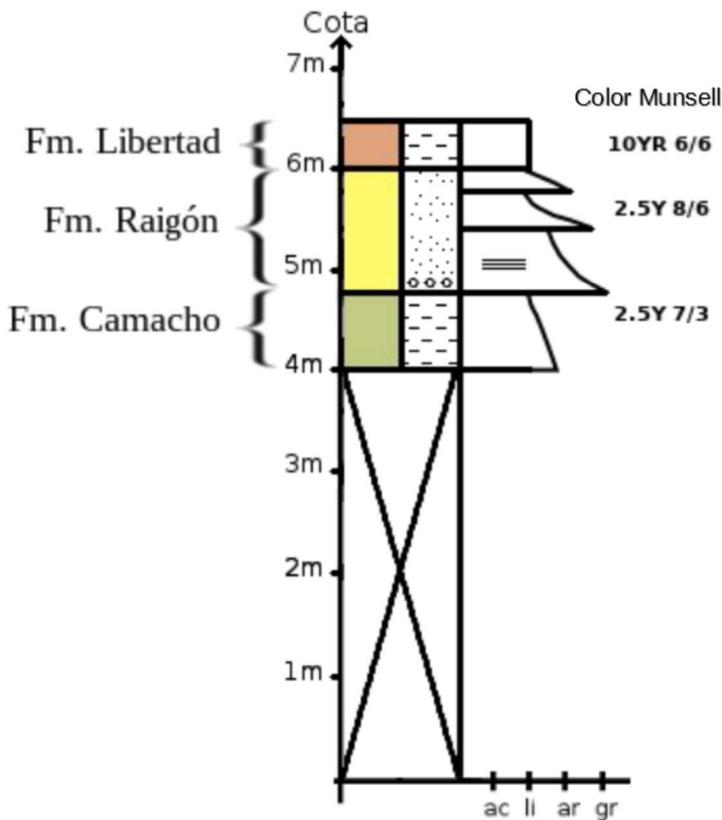
Figura 21: perfiles estratigráficos de las barrancas costeras de los sitios 2 y 3 (s2 y s3 de la Figura 12)

Sitio "S12-2":

Sitio "S14":



Sitio "S12-1":



-  Laminación convoluta
-  Bioturbación
-  Grietas de desecación
-  Estratificación planoparalela
-  Estratificación cruzada

-  Inaccesible o cubierto
-  Pelitas
-  Conglomerado
-  Areniscas

Figura 22: perfiles estratigráficos de las barrancas costeras de los sitios 12 y 14 (s12 y s14 de la Figura 12)

Correlación de perfiles estratigráficos:

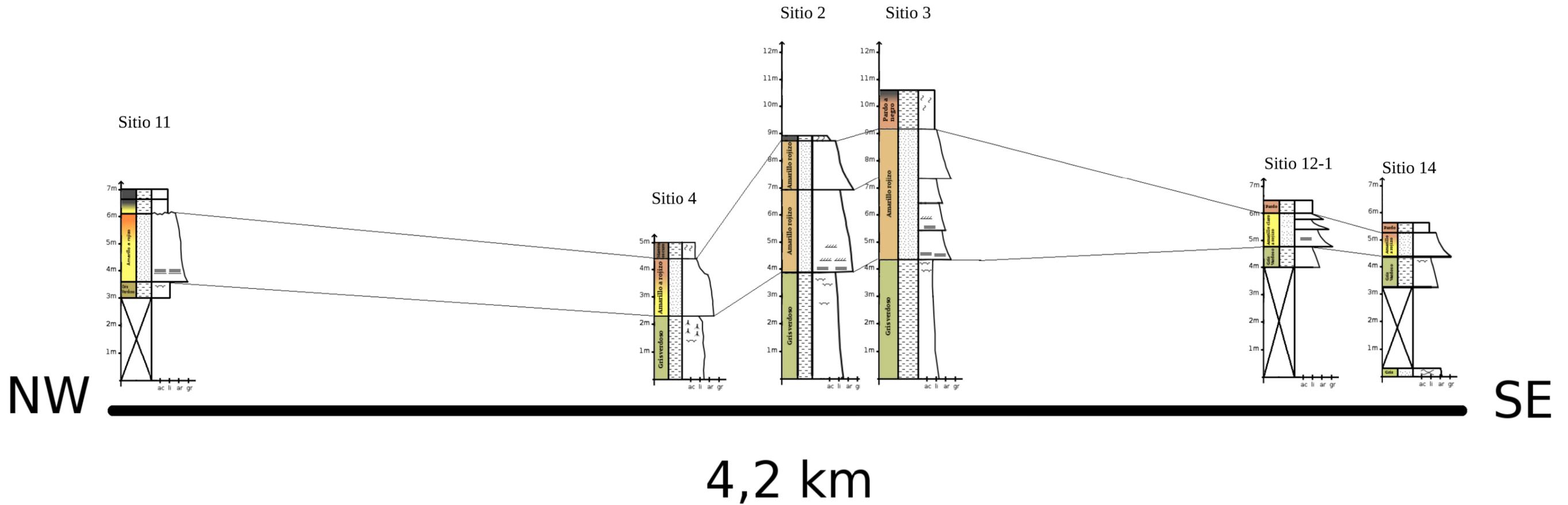


Figura 23: Correlación de perfiles estratigráficos.

5.5- Cortes geológicos

A continuación se presentan 4 cortes geológicos de la zona de estudio. 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 intersectarse de forma tal que se pueda confeccionar un bloque diagrama 3d a partir de éstos.

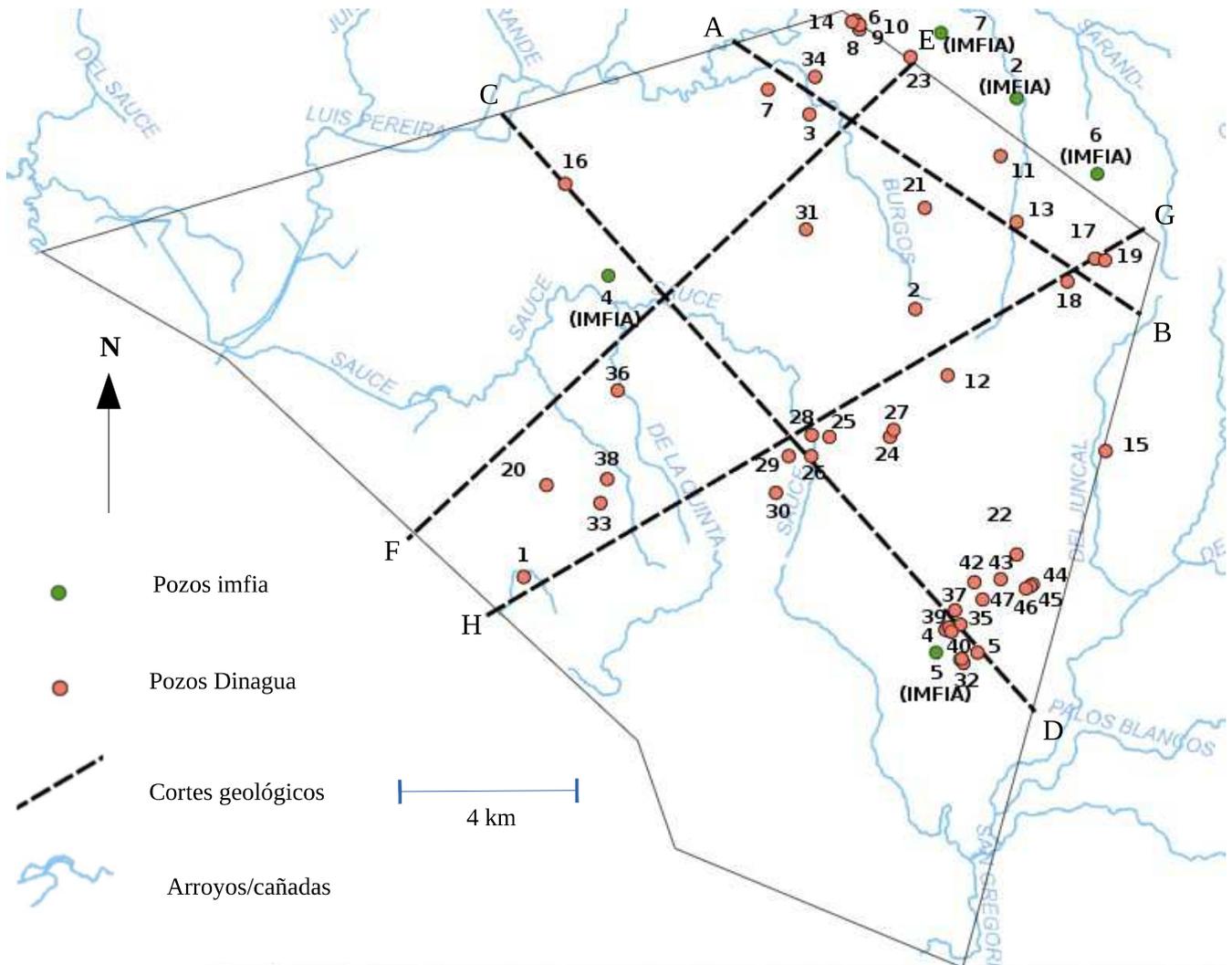


Figura 24: zona de estudio con localización de pozos y cortes geológicos

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 25a** y **25b**.

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.

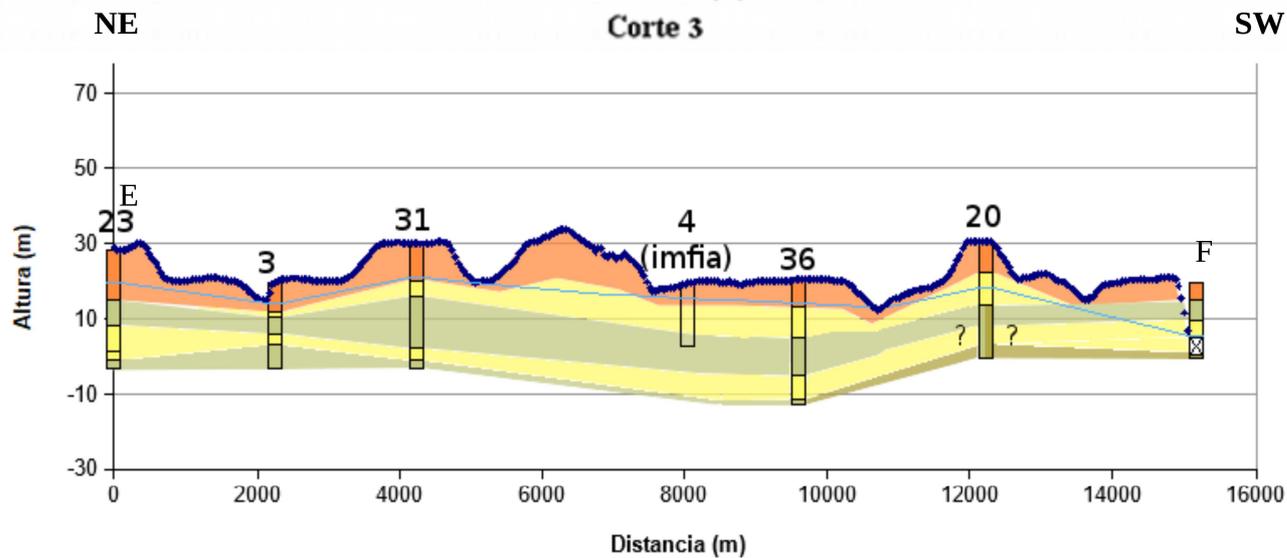
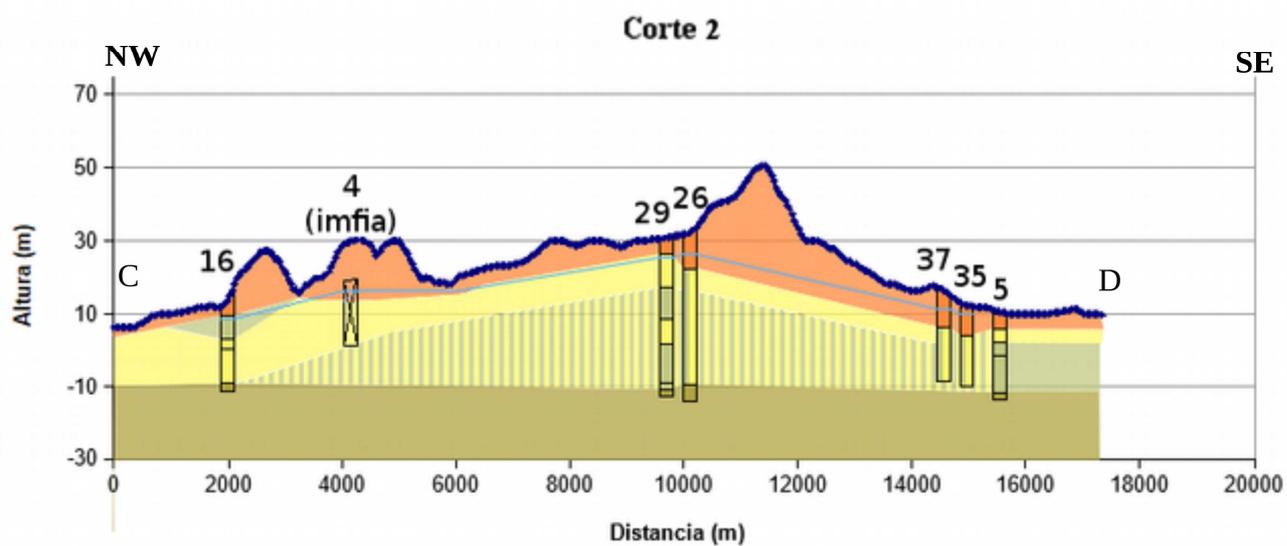
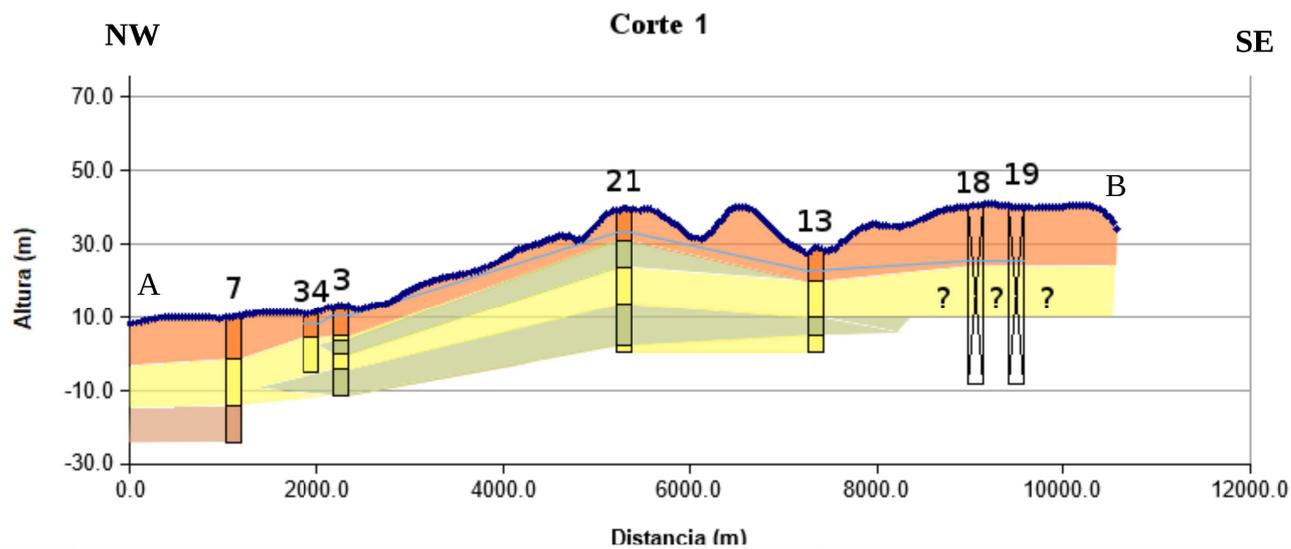


Figura 26a: Cortes geológicos 1 al 3

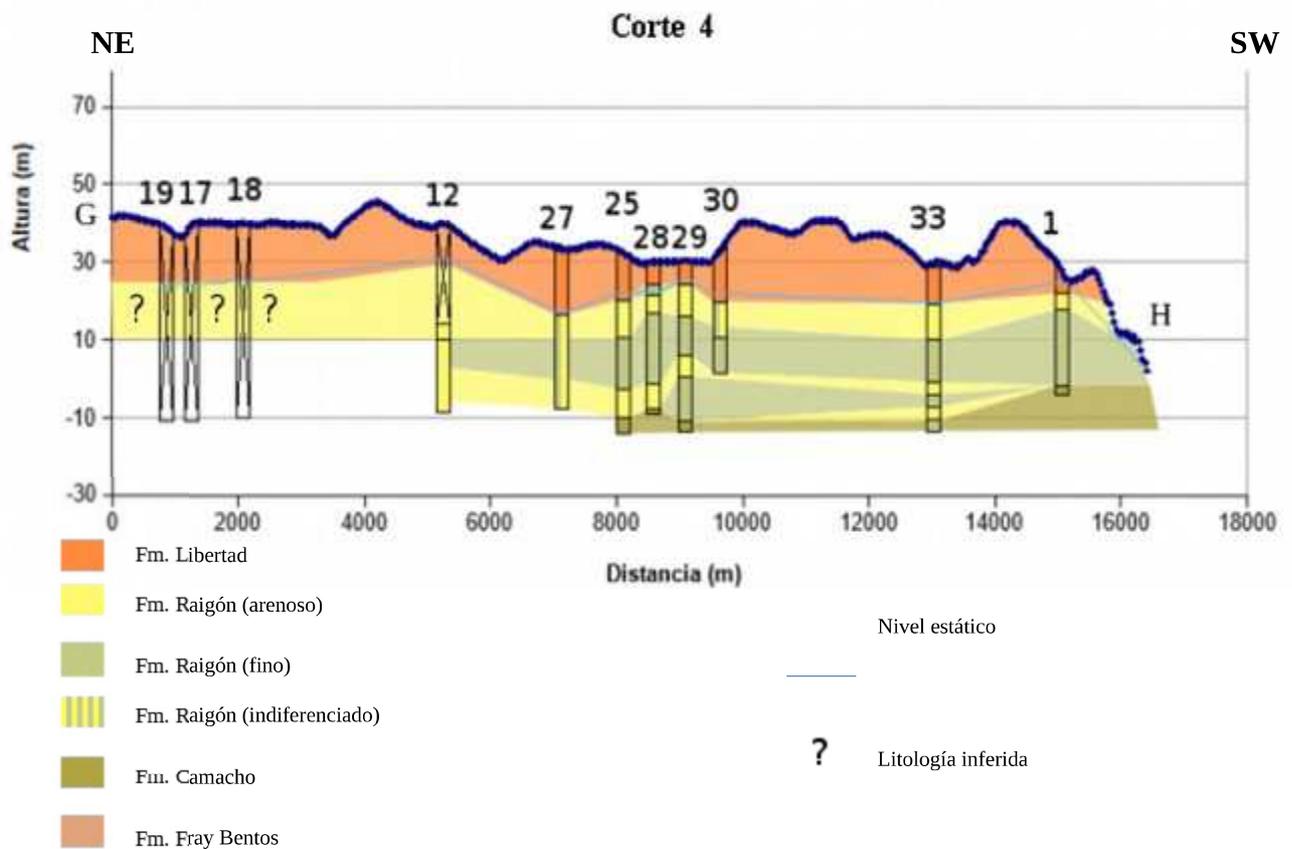


Figura 25b: Corte geológico 4 y leyenda

En los 4 cortes se observan niveles arcillosos de 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.

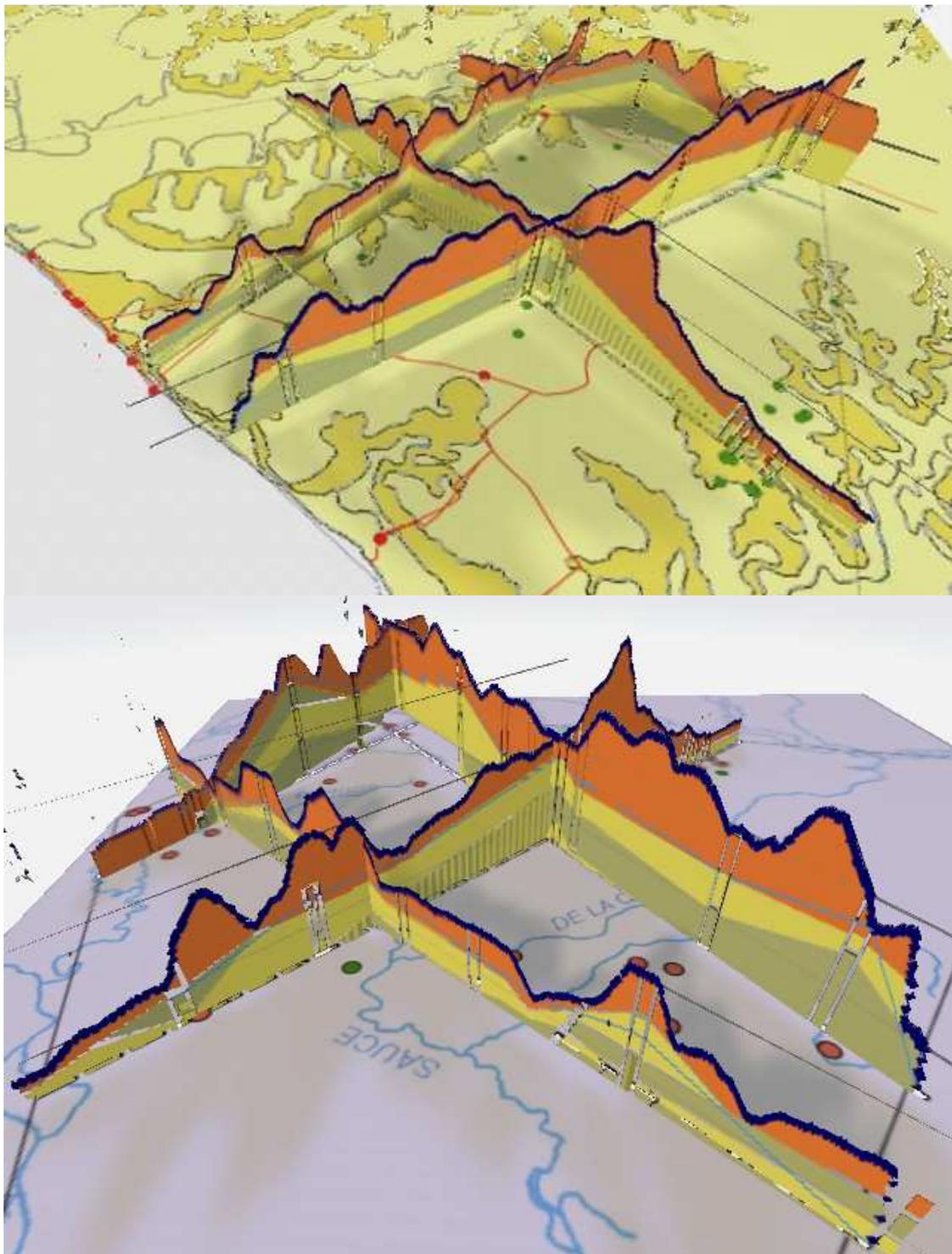


Figura 26: Bloques diagrama que incluyen todos los cortes en perspectiva.

Al colocar en perspectiva los cortes geológicos sobre el mapa geológico de San José a escala 1/100000 (figura 26), 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 a la Formación Raigón aflorante, si no a la Formación Libertad con un espesor menor al que presenta en zona de interfluvios.

6- Discusión

Análisis sedimentológico:

Se corroboró la composición cuarzo-feldespática para tamaños arena media a gruesas, que gradúa a principalmente cuarzosa para las granulometrías más finas tal como menciona Pérez Peirano (1991).

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 observó un pequeño porcentaje (alrededor de 1%) de minerales opacos en lupa y microscopio (posiblemente magnetita y/o hematita). No se observaron fragmentos de vitroclastos en ninguna de las muestras analizadas, los cuales habrían corroborado un posible origen volcánico-clástico como se sugiere en Recksiegel et al. (2016).

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 Martínez (1994) para la zona de estudio. En los mismos, la gradación de tamaños arena a limo-arcilla dentro de la Formación Raigón, se da de forma gradual y cíclicamente hacia techo, generando secuencias grano y estratodecrecientes. 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 (figura 27. Arche, 1992), o a ambientes de estuarios y llanuras intermareales similares a los de la figura 28 (Vilas, 1992).

Los cortes geológicos evidencian para los primeros 40, 50m 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 Formación 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 Formación 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 Formación Libertad, por lo que en términos hidrogeológicos, en estos puntos, la Formación 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 Formación 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 Formación Fray Bentos (origen continental).

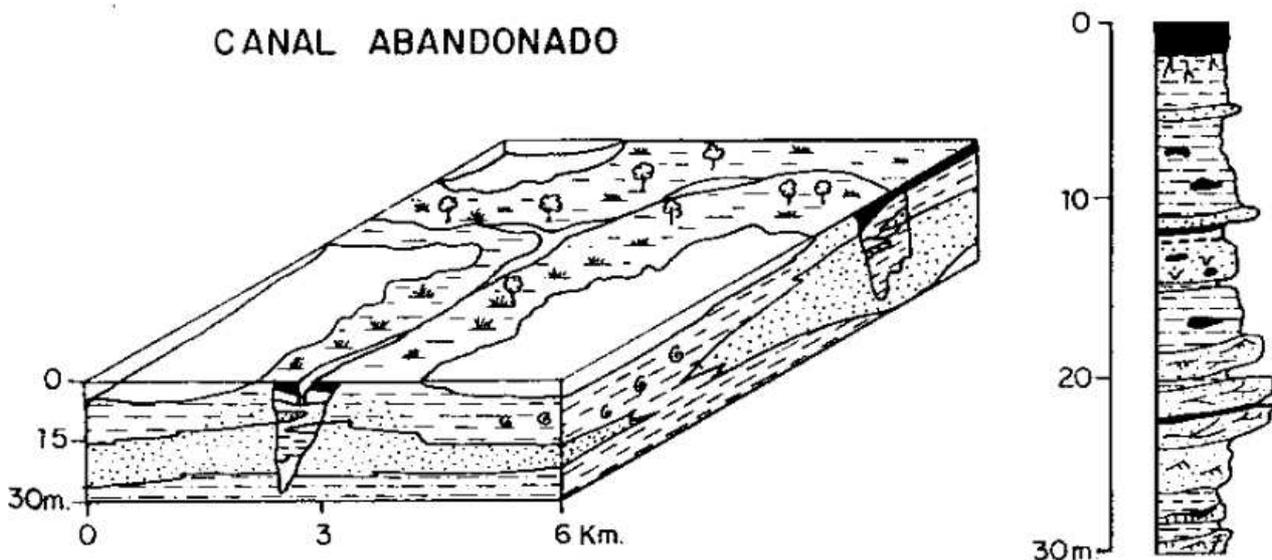


Figura 27: Secuencia de canal abandonado según Coleman y Prior, 1980, en Arche (1992)

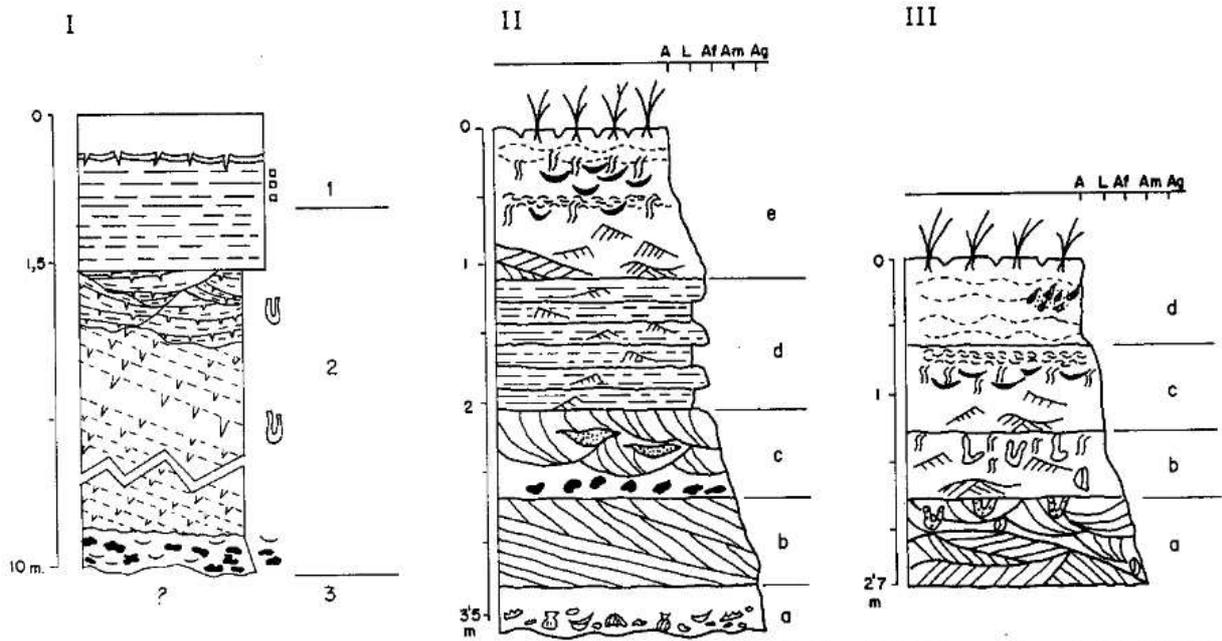


Figura 28: Diferentes tipos de secuencias teóricas verticales para las llanuras bajas de un ambiente de estuario y llanuras intermareales. I: Llanura mareal lutítica de San Sebastián (Argentina), II: Margen de canal mareal (Ensenada de San Simón, Ría de Vigo, III: Parte centra de la llanura intermareal de la Ensenada de San Simón, Ría de Vigo. (Vilas, 1992)

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.

7- 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 los datos generados 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.
 - La composición es cuarzo-feldespática tendiendo a mayoritariamente cuarzosa para muestras con granulometrías más finas. Presenta cementación carbonática en algunos niveles, y un porcentaje mínimo (1% o menor) de minerales oscuros.
 - Los clastos presentan morfologías mayoritariamente esféricas a proladas y subredondeadas a subangulosas para granulometrías arenosas. Para tamaños limo, se observan clastos netamente angulosos a muy angulosos, y morfologías proladas
 - Los perfiles estratigráficos revelaron una secuencia estrato y grano decrecientes para los depósitos de la Formación Raigón.
 - 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 Formación Raigón que componen el acuífero propiamente dicho.
 - Se determinó la conductividad hidráulica para una muestra arenosa y para una muestra limo-arcillosa de la Formación 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 Formación 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, podríanse 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.

8- Referencias bibliográficas

- 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.
- Martinez, 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; Osores, 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; Oyhantçabal, 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.*
- Vesroslavsky, 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.*

Anexo I: datos de pozos (DINAGUA)

ANEXO I

Datos de pozos (DINAGUA):

| N° Pozo | Coord. X (*) | Coord. Y (*) | Prof. (m) | Nivel Estático | Nivel Dinámico | Caudal (m3/h) | Perfil litológico | | | | | | | | | |
|---------|--------------|--------------|-----------|----------------|----------------|---------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| | | | | | | | 0-2 Fm. Libertad | 2-7 Fm. Raigón arenosa | 7-29 Fm. Raigón arcilloso | 29-30 Fm. Camacho | 0-16 Fm. Libertad | 16-45 Fm. Raigón | 7-8 Sedimento o arenoso | 8-14 Sedimento o arcilloso marrón | 14-17 Sedimento o arenoso arcilloso marrón | 17-26 Sedimento o arcilloso marrón |
| 1 | 396300 | 6171350 | 30 | 0,8 | 10,8 | 10,5 | 0-2 Fm. Libertad | 2-7 Fm. Raigón arenosa | 7-29 Fm. Raigón arcilloso | 29-30 Fm. Camacho | | | | | | |
| 2 | 404800 | 6177200 | 50,5 | 16,5 | 24,8 | 90 | 0-16 Fm. Libertad | 16-45 Fm. Raigón | 7-8 Sedimento o arenoso | 8-14 Sedimento o arcilloso marrón | 14-17 Sedimento o arenoso arcilloso marrón | 17-26 Sedimento o arcilloso marrón | | | | |
| 3 | 402500 | 6181450 | 26 | 1 | 12,12 | 50 | 0-1 Suelo | 1-7 Sedimento arcilloso marrón | 7-8 Sedimento o arenoso | 8-14 Sedimento o arcilloso marrón | 14-17 Sedimento o arenoso arcilloso marrón | 17-26 Sedimento o arcilloso marrón | | | | |
| 4 | 405450 | 6170200 | 30 | 3,7 | 23,8 | 15 | 0-4 Fm. Libertad | 4-28 Fm. Raigón | 28-30 Fm. Camacho | | | | | | | |
| 5 | 406150 | 6169700 | 25 | | | 6 | 0-4 Fm. Libertad. Arcilloso pardo | 4-8 Arenoso grueso a muy grueso en la base | 8-12 Impalpable, super fino. Gris | 12-24 Arcilloso gris | 24-25 Arenisca con conchillas. Fm. Camacho | | | | | |
| 6 | 403500 | 6183500 | 52 | 13,6 | 37,4 | 5 | 0-28 Arcilla marrón | 28-34 Arcilla con gravas marrón | 34-39 Arcilla verde | 39-42 Gravas y arena aciliosa marrón | 42-47 Arcilla con pocas gravas | 47-50 Gravas y arena arcilloso rojizo | 50-52 Basamento descompuesto | | | |
| 7 | 401602 | 6181994 | 38 | | | 4,5 | 0-12 Lodolitas con arena dispersa Fm. Libertad | 12-25 Arena gravilosa. Fm. Raigón | 25-35 Fm. Fray Bentos | | | | | | | |
| 8 | 403586 | 6183305 | 20 | 2,5 | 6,55 | 7 | 0-5 Arcilla masiva marrón | 5-10 Arena media a gruesa | 10-41 Arcilla masiva gris y verde | 41-52 Granito gris fresco | | | | | | |
| 9 | 403581 | 6183399 | 15 | 1,8 | 8,4 | 7 | 0-7 | 7-11 Arenas | 11-12 | 12-15 | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|---------|------|-----|----|-----|------|---|----------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|--------------------|
| 9 | | | | | | | | | Sedimento limo arcilloso. Fm. Libertad | gruesas a gravilosas con poco cemento arcilloso | Arenas finas a gravilosas con matriz arcillosa | Arenas gruesas a gravilosas con poco cemento arcilloso | 14-17 Tentativo basamento alterado | 17-23 Basamento triturado, tenaz | 23-24 Arcilla rosada | 24-29 Arcilla gris |
| 10 | 403587 | 6183405 | 52,5 | | | | 39,5 | 7 | 1-3 Sedimento limo arcilloso | 3-8 Arenas finas | 8-13 Arenas medias a gruesas | 13-14 Arcillas | | | | |
| 11 | 406650 | 6180540 | 32 | 7 | 16 | 76 | | | 9-16 Arena media | 18-19 Arena media a gruesa | 24-27 Arena media a fina | | | | | |
| 12 | 405500 | 6175750 | 48 | 8 | 19 | 43 | | | 0-26 Sin dato | 26-30 Arena media | 39-48 Arena fina | | | | | |
| 13 | 407000 | 6179100 | 36 | 6,5 | 17 | 25 | | | 0-9 Suelo | 9-19 Arena media | 24-28 Arena fina | | | | | |
| 14 | 403426 | 6183474 | 20 | 9 | 18 | 2,5 | | | 0-6 Arcilla | 6-10 Arena fina mal seleccionada | 10-15 Arena gruesa | 15-20 Arcilla con presencia de arena gruesa | | | | |
| 15 | 408930 | 6174099 | 22 | 10 | 17 | 10 | | | 0-5 Limos. Fm. Libertad | 5-20 Arenas y arcillas. Fm. Raigón | | | | | | |
| 16 | 397200 | 6179934 | 26 | 4,3 | 10 | 8 | | | 0-1 Suelo | 1-6 Limos. Fm Libertad | 6-12 Arcilla gris. Fm. Raigón | 12-14 Arena muy fina arcillosa | 14-23 Arena fina | 23-25 Arena muy fina arcillosa. Fm. Camacho | | |
| 17 | 408700 | 6178300 | 50 | 14 | 20 | 35 | | | sin datos | | | | | | | |
| 18 | 408100 | 6177800 | 50 | 14 | 25 | 30 | | | sin datos | | | | | | | |
| 19 | 408919 | 6178265 | 50 | 14 | 20 | 35 | | | sin datos | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|---------|------|-------|------|----|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--|--|
| 20 | 396794 | 6173357 | 20,5 | 10,26 | 11,5 | 3 | 0-1 Suelo | 1-7 Arcilla | 7-14 Arcilla arenosa - arena fina - arena gruesa | 14-16 Arcilla con gravilla | 16-30 Arcilla | | |
| 21 | 405006 | 6179408 | 42 | 6 | 14 | 32 | 0-6 Arcilla limosa marrón. Fm. Libertad | 6-15 Arena arcillosa gris verdoso. Fm. Raigón | 15-25 Arena gruesa gravillosa. Fm. Raigón | 25-36 Arcilla gris clara. Fm. Raigón | 36-39 Grava y cantos rodadas. Fm. Raigón | | |
| 22 | 406999 | 6171842 | 20 | 9 | 12 | 18 | 0-1 Suelo | 1-6 Fm. Libertad | 6-20 Fm. Raigón | | | | |
| 23 | 404694 | 6182705 | 32 | 12 | 18 | 7 | 0-12 QI | 12-19 Arcillas y arenas arcillosas | 19-26 Arenas arcillosas | 26-30 Arenas | 30-32 Arcillas | | |
| 24 | 404249 | 6174410 | 45 | 20 | 25 | 30 | 0-23 Pardo marrón a verdoso | 23-30 Arena fina terciada. Fm. Raigón | 30-39 Arcilloso verde | 39-43 Arenoso fino | 43-45 Arcilloso | | |
| 25 | 402934 | 6174409 | 46 | 11 | 22 | 30 | 0-13 Limo arcilloso pardo. Fm. Libertad | 13-21 Arenoso grueso a muy grueso en la base. Fm. Raigón | 21-36 Arcilloso verde | 36-42 Arenoso fino a medio a grueso con gravillín en la base | 42-46 Fm. Camacho. Arenoso firme compacto | | |
| 26 | 402540 | 6173990 | 46 | 5 | 15 | 60 | 0-12 Limo arcilloso pardo. Fm. Libertad | 12-42 Fm. Raigón | 42-46 Fm. Camacho | | | | |
| 27 | 404329 | 6174560 | 46 | 21 | 26 | 40 | 0-22 Arcilloso. Fm. Libertad/Raigón en la base | 22-46 Arenoso con intercalación de arcillas. Fm. Raigón | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|---------|------|------|------|----|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|
| 28 | 402550 | 6174450 | 37,5 | 7 | 22 | 30 | 0-6 Limo arcilloso pardo Fm Libertad | 6-8 Arcilla verde. Fm. Raigón | 8-14 Arenisca gruesa | 14-32 Arcillosos o verdoso | 32-36 Arenoso grueso | 36-37,5 Arenisca firme con conchillas . Fm. Camacho | | |
| 29 | 402050 | 6173990 | 42 | 5 | 15 | 60 | 0-6 Limo arcilloso pardo Fm Libertad | 6-16 Arena fina- media a gruesa en al base. Fm. Raigón | 16-23 Arcilloso gris | 23-28 Arena media a grueso con arena fina | 28-40 Arcilla verde con estratos de arena gruesa | 40-42 Arcillo arenoso | 42- Arenisca con conchilla. Fm. Camacho | |
| 30 | 401773 | 6173188 | 30 | 13 | 22 | 30 | 0-16 Arcilloso pardo. Fm. Libertad | 16-25 Arenas gruesas con alternancia de arcilla. Fm. Raigón | 25-35 Arcilloso | | | | | |
| 31 | 402426 | 6178939 | 34 | 9 | 24 | 8 | 0-10 Sedimentos Ql | 10-14 Arenas y areniscas. Fm. Raigón | 14-28 Areniscas muy arcillosas | 28-32 Arenas de Fm. Raigón | 32-34 Arcillas verdes | | | |
| 32 | 405846 | 6169473 | 45 | 7 | 12,5 | 30 | sin datos | | | | | | | |
| 33 | 397963 | 6172965 | 43 | 10,5 | 13 | 20 | 0-1 Suelo | 1-11 Arcilla. Fm. Libertad | 11-20 Arena media a gruesa. Fm. Raigón | 20-32 Arcilla. Fm. Raigón | 32-34 Arena media a gruesa. Fm. Raigón | 34-37 Arcilla. Raigón | 37-40 Arena media a gruesa. Fm. Raigón | 40-43 Arcilla. Raigón |
| 34 | 402623 | 6182269 | 17 | 2,4 | 14,7 | 3 | 0-1 Suelo | 1-6 Arcilla marrón | 6-17 Arena muy fina con niveles arenosos | | | | | |
| 35 | 405779 | 6170310 | 25 | 3 | 6 | 15 | 0-1 Suelo | 1-10 Arcilla marrón | 10-25 Arenas medias | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|---------|----|------|------|----|---------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 36 | 398338 | 6175423 | 33 | 5,5 | 25 | 20 | 0-1 Suelo | 1-6 Arcilla marrón | 6-16 Arena media a gruesa | 16-26 Arcilla gris | 26-32 Arena media a gruesa | 32-33 Arcilla color gris | | |
| 37 | 405661 | 6170624 | 29 | 4 | 18 | 25 | 0-1 Suelo | 1-10 Arcilla marrón | 10-29 Arenas medias con niveles arcillosos | | | | | |
| 38 | 398112 | 6173486 | 41 | 10 | 12 | 20 | 0-1 Suelo | 1-8 Arcilla Fm. Libertad | 8-20 Arcilla media a gruesa. Raigón | 20-30 Arcilla Raigón | 30-34 Arena media gruesa | 34-37 Arcilla. Raigón | 37-39 Arena media gruesa | 39-41 Arcilla. Raigón |
| 39 | 405532 | 6170249 | 30 | 20 | 25 | 11 | 0-12 Fm. Libertad. Lodolitas con arenas dispersas | 12-25 Fm. Raigón. Areniscas gravilosas | 25-35 Fm. Fray Bentos | | | | | |
| 40 | 405582 | 6170157 | 35 | 20 | 25 | 15 | 0-12 Fm. Libertad. Lodolitas con arenas dispersas | 12-25 Fm. Raigón. Areniscas gravilosas | 25-35 Fm. Fray Bentos. Areniscas muy finas | | | | | |
| 41 | 405806 | 6169564 | 29 | 6 | 10 | 80 | 0-5 Fm. Libertad | 5-14 Fm. Raigón arenoso | 14-19 Fm. Raigón arcilloso | 19-25 Fm. Raigón arenoso | 25-29 Fm. Camacho. Arenisca gris dura | | | |
| 42 | 406081 | 6171236 | 40 | 5 | 32 | 12 | sin datos | | | | | | | |
| 43 | 406653 | 6171302 | 39 | 10 | 20,5 | 20 | sin datos | | | | | | | |
| 44 | 407348 | 6171188 | 34 | 17 | 26,6 | 14 | sin datos | | | | | | | |
| 45 | 407300 | 6171150 | 40 | 14,6 | 32,5 | 12 | 0-6 Fm. Libertad | 6-39 Fm. Raigón | 39-40 Fm. Camacho | | | | | |
| 46 | 407200 | 6171100 | 33 | 14 | 26 | 10 | 0-6 Fm. | 6-28 Fm. | 28-33 Fm. | | | | | |

Anexo II: datos de ensayos

Granulometría:

Tamizado

| Abertura (micras) | s3m1 Retenido parcial | s3m2 Retenido parcial | s3m3 Retenido parcial |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 63800 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 50800 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 36100 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 25400 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 19000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 12700 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 9500 | 5.9 | 4.9 | 0.0 |
| 4760 | 10.2 | 36.2 | 17.0 |
| 2000 | 70.6 | 102.5 | 51.8 |
| 420 | 900.1 | 416.4 | 128.7 |
| 149 | 8.9 | 295.8 | 748.5 |
| 74 | 1.1 | 61.3 | 31.0 |

| Abertura (micras) | s4m1 Retenido parcial | s4m2 Retenido parcial |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| 63800 | 0.0 | 0.0 |
| 50800 | 0.0 | 0.0 |
| 36100 | 0.0 | 0.0 |
| 25400 | 0.0 | 0.0 |
| 19000 | 0.0 | 0.0 |
| 12700 | 0.0 | 0.0 |
| 9500 | 0.0 | 0.0 |
| 4760 | 2.1 | 89.6 |
| 2000 | 60.6 | 159.5 |
| 420 | 747.3 | 217.6 |
| 149 | 146.0 | 268.4 |
| 74 | 29.4 | 197.6 |

| Abertura (micras) | s4m3 Retenido parcial |
|-------------------|--------------------------|
| 63800 | 0.0 |
| 50800 | 0.0 |
| 36100 | 0.0 |
| 25400 | 0.0 |
| 19000 | 0.0 |
| 12700 | 0.0 |
| 9500 | 4.6 |
| 4760 | 124.8 |
| 2000 | 278.3 |
| 841 | 295.9 |
| 420 | 120.6 |
| 149 | 123.4 |
| 74 | 53.0 |

| Abertura (micras) | s11m1 Retenido parcial | s14m1 Retenido parcial |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| 63800 | 0.0 | 0.0 |
| 50800 | 0.0 | 0.0 |
| 36100 | 0.0 | 0.0 |
| 25400 | 0.0 | 0.0 |
| 19000 | 0.0 | 0.0 |
| 12700 | 0.0 | 0.0 |
| 9500 | 0.0 | 4.7 |
| 4760 | 5.6 | 70.1 |
| 2000 | 30.6 | 132.9 |
| 420 | 414.7 | 156.9 |
| 149 | 240.0 | 486.0 |
| 74 | 19.1 | 68.8 |

| s3m4 | |
|-------------------|------------------|
| Abertura (micras) | Retenido parcial |
| 63800 | 0.0 |
| 50800 | 0.0 |
| 36100 | 0.0 |
| 25400 | 0.0 |
| 19000 | 0.0 |
| 12700 | 0.0 |
| 9500 | 0.0 |
| 4760 | 0.0 |
| 2000 | 0.0 |
| 841 | 2.1 |
| 476 | 12.4 |
| 149 | 20.3 |
| 74 | 3.8 |

| s11m2 | | s14m2 |
|-------|------------------|------------------|
| | Retenido parcial | Retenido parcial |
| 63800 | 0.0 | 0.0 |
| 50800 | 0.0 | 0.0 |
| 36100 | 0.0 | 0.0 |
| 25400 | 0.0 | 0.0 |
| 19000 | 0.0 | 0.0 |
| 12700 | 0.0 | 0.0 |
| 9500 | 0.0 | 0.0 |
| 4760 | 0.0 | 0.0 |
| 2000 | 0.1 | 0.1 |
| 420 | 2.2 | 0.3 |
| 149 | 4.6 | 3.3 |
| 74 | 3.4 | 12.9 |

Ensayo de Sedimentación

| s3m4 | |
|----------------------------|--------------------------|
| Tamaño depositado (micras) | Porcentaje en suspensión |
| 72.8 | 31.0 |
| 51.8 | 29.2 |
| 36.6 | 29.2 |
| 26.1 | 27.5 |
| 18.6 | 25.8 |
| 13.6 | 24.1 |
| 9.7 | 22.5 |
| 6.8 | 22.5 |
| 4.9 | 19.1 |
| 3.5 | 17.3 |
| 3.1 | 15.6 |
| 1.4 | 14.0 |

| s11m2 | | s14m2 | |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tamaño depositado (micras) | Porcentaje en suspensión | Porcentaje en suspensión | Porcentaje en suspensión |
| 47.4 | 79.9 | 74.3 | |
| 34.9 | 75.7 | 67.7 | |
| 25.6 | 71.4 | 65.0 | |
| 18.5 | 68.6 | 59.7 | |
| 13.5 | 64.4 | 55.7 | |
| 10.1 | 61.6 | 50.4 | |
| 7.4 | 56.0 | 46.4 | |
| 5.4 | 51.8 | 41.1 | |
| 3.9 | 47.6 | 38.4 | |
| 2.8 | 43.6 | 34.6 | |

Densidad total:

DENSIDAD TOTAL

Temperatura (°C): 19.8 Densidad de parafina (g/cm³): 0.87

| Muestra | Masa suelo | Masa suelo + parafina | Densidad del agua (g/cm ³) | Volumen suelo +parafina (cm ³) | Volumen parafina (cm ³) | Densidad húmeda (g/cm ³) | Densidad seca (g/cm ³) |
|---------|------------|-----------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| s3m2 | 202.51 | 225.28 | 0.9945 | 143.78 | 26.17 | 1.72 | 1.57 |
| s3m3 | 308.62 | 330.51 | 0.9945 | 207.83 | 25.16 | 1.69 | 1.54 |
| s3m4 | 229.34 | 249.59 | 0.9945 | 147.21 | 23.28 | 1.85 | 1.68 |
| s4m1 | 301 | 327.7 | 0.9945 | 189.4 | 30.69 | 1.90 | 1.72 |
| s4m2 | 511.89 | 537.86 | 0.9945 | 300.12 | 29.85 | 1.89 | 1.72 |
| s4m3 | 187.45 | 203.19 | 0.9945 | 116.31 | 18.09 | 1.91 | 1.74 |
| s11m1 | 278.12 | 301.1 | 0.9945 | 189.88 | 26.41 | 1.70 | 1.55 |
| s11m2 | 181.15 | 199.16 | 0.9945 | 113.42 | 20.70 | 1.95 | 1.78 |
| s14m1 | 199.46 | 217.87 | 0.9945 | 136.13 | 21.16 | 1.73 | 1.58 |
| s14m2 | 344.03 | 380.72 | 0.9945 | 219.14 | 42.17 | 1.94 | 1.77 |

No fue posible extraer una muestra de s3m1 que conservara la estructura original.

Densidad de partículas sólidas:

Muestra s11m2 Masa seca (g) 51.2

Nº picnómetro 1

| Temperatura (°C) | Masa muestra +agua +picnometro (g) | M2 (g) | Peso específico (g/mL) |
|------------------|------------------------------------|--------|------------------------|
| 17.2 | 703.67 | 671.38 | 2.71 |
| 36.4 | 701.7 | 669.21 | 2.74 |
| 33.6 | 702.13 | 669.53 | 2.75 |
| 29.4 | 702.67 | 670.00 | 2.76 |
| 25 | 703.18 | 670.50 | 2.76 |
| Promedio | | | 2.74 |

Muestra s3m1 Masa seca (g) 59.3

Nº picnómetro pdcb

| Temperatura (°C) | Masa muestra +agua +picnometro (g) | M2 (g) | Peso específico (g/mL) |
|------------------|------------------------------------|--------|------------------------|
| 17.6 | 665.5 | 628.53 | 2.66 |
| 30.4 | 664.39 | 626.81 | 2.73 |
| 26.8 | 664.76 | 627.29 | 2.72 |
| 20.8 | 665.3 | 628.10 | 2.69 |
| 24.6 | 664.8 | 627.59 | 2.69 |
| Promedio | | | 2.70 |

Porosidad:

Porosidad

Densidad de sólidos arenas (g/cm³): 2,7
 Densidad de sólidos finos (g/cm³): 2,74

| Muestra | Densidad de total (g/cm ³) | Porosidad (%) |
|---------|----------------------------------------|---------------|
| s3m2 | 1,57 | 42,0 |
| s3m3 | 1,54 | 43,1 |
| s3m4 | 1,68 | 37,7 |
| s4m1 | 1,72 | 36,1 |
| s4m2 | 1,72 | 36,2 |
| s4m3 | 1,74 | 35,7 |
| s11m1 | 1,55 | 43,6 |
| s11m2 | 1,78 | 34,2 |
| s14m1 | 1,58 | 42,4 |
| s14m2 | 1,77 | 34,5 |

Conductividad hidráulica:

Muestra s3m1

Peso seco (g)= 2670 Peso específico húmedo (g/cm³)= 1.92
 Área sección (cm²)= 69.4 Peso específico seco (g/cm³)= 1.75
 Altura de la muestra (cm)= 20 Humedad = % 10
 Altura de col. de agua (cm)= 5 Porosidad = % 34.5

| Fecha | Hora | Volúmen (ml) | Presión | T (°C) | k (m/s) |
|-----------|-------|--------------|--------------|--------|----------|
| 15/2/2019 | 11:13 | 0 | Hidrostática | 20 | |
| 15/2/2019 | 11:14 | 430 | Hidrostática | 20 | 2.46E-04 |
| 15/2/2019 | 11:15 | 420 | Hidrostática | 20 | 2.40E-04 |
| 15/2/2019 | 11:16 | 420 | Hidrostática | 20 | 2.40E-04 |
| 15/2/2019 | 11:17 | 400 | Hidrostática | 20 | 2.29E-04 |
| 15/2/2019 | 11:18 | 410 | Hidrostática | 20 | 2.34E-04 |
| 15/2/2019 | 11:19 | 350 | Hidrostática | 20 | 2.00E-04 |
| 15/2/2019 | 11:20 | 340 | Hidrostática | 20 | 1.94E-04 |
| 15/2/2019 | 11:21 | 340 | Hidrostática | 20 | 1.94E-04 |
| 15/2/2019 | 11:22 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:23 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:24 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:25 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:26 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:27 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:28 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:29 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:30 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:31 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:32 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:33 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:34 | 330 | Hidrostática | 20 | 1.89E-04 |
| 15/2/2019 | 11:35 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:36 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:37 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:38 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:39 | 310 | Hidrostática | 20 | 1.77E-04 |
| 15/2/2019 | 11:40 | 320 | Hidrostática | 20 | 1.83E-04 |
| 15/2/2019 | 11:41 | 310 | Hidrostática | 20 | 1.77E-04 |
| 15/2/2019 | 11:42 | 310 | Hidrostática | 20 | 1.77E-04 |
| 15/2/2019 | 11:43 | 310 | Hidrostática | 20 | 1.77E-04 |

Muestra s11m2

Peso seco (g)= 447 Peso específico húmedo= 1.62
 Área sección (cm²)= 69.4 Peso específico seco = 1.41
 Altura de la muestra (cm)= 4.2 Humedad = % 15
 Altura de col. de agua (cm)= 80 Porosidad = % 48.6

| Fecha | Hora | Volúmen (ml) | Presión | T (°C) | K(m/s) |
|-----------|-------|--------------|--------------|--------|----------|
| 15/2/2019 | 14:15 | 0 | Hidrostática | 20 | |
| 15/2/2019 | 17:15 | 19 | Hidrostática | 20 | 1.21E-08 |
| 18/2/2019 | 11:00 | 246 | Hidrostática | 20 | 6.58E-09 |
| 18/2/2019 | 11:00 | 0 | Hidrostática | 20 | |
| 19/2/2019 | 14:30 | 46 | Hidrostática | 20 | 3.19E-09 |
| 20/2/2019 | 10:00 | 60 | Hidrostática | 20 | 1.37E-09 |
| 22/2/2019 | 14:00 | 78 | Hidrostática | 20 | 6.60E-10 |
| 25/2/2019 | 14:50 | 94 | Hidrostática | 20 | 4.19E-10 |
| 26/2/2019 | 10:20 | 98 | Hidrostática | 20 | 3.91E-10 |
| 27/2/2019 | 14:00 | 106 | Hidrostática | 20 | 5.51E-10 |
| 28/2/2019 | 13:10 | 112 | Hidrostática | 20 | 4.94E-10 |
| 1/3/2019 | 15:15 | 122 | Hidrostática | 21 | 7.31E-10 |
| 6/3/2019 | 14:30 | 180 | Hidrostática | 21 | 9.27E-10 |
| 7/3/2019 | 14:30 | 194 | Hidrostática | 21 | 1.11E-09 |
| 8/3/2019 | 14:30 | 205 | Hidrostática | 21 | 8.74E-10 |
| 8/3/2019 | 14:30 | 0 | Hidrostática | 21 | |
| 11/3/2019 | 11:00 | 34 | Hidrostática | 21 | 9.46E-10 |
| 12/3/2019 | 10:30 | 44 | Hidrostática | 21 | 8.11E-10 |
| 13/3/2019 | 12:15 | 55 | Hidrostática | 21 | 8.14E-10 |
| 14/3/2019 | 11:30 | 64 | Hidrostática | 21 | 7.38E-10 |
| 15/3/2019 | 11:00 | 74 | Hidrostática | 21 | 8.11E-10 |