DEMANDA POTENCIAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO ARAPEY

ACUÍFERO ARAPEY

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS – MODELO DE FLUJO DEL ACUÍFERO VOLCÁNICO ARAPEY

Ministerio de Industria Energía y Minería - Dirección Nacional de Minería y Geología - Área Geología

ACUÍFERO ARAPEY

Aspectos hidrogeológicos – modelo de flujo del acuífero volcánico Arapey

Ministerio de Industria, Energía y Minería

DIRECCIÓN NACIONAL DE MINERÍA Y GEOLOGÍA

- ÁREA GEOLOGÍA -

Autores : Javier Techera

Diego Izquierdo

Walter Heinzen

Montevideo, abril de 2020

PRESENTACIÓN

El presente trabajo tiene como foco central abordar distintos aspectos relacionados a la hidrogeología de la formación Arapey. Para ello se realizó un procesamiento y síntesis de la información y datos geológico-hidrogeológicos existentes de toda la unidad aflorante y posteriormente se ejecutó un estudio de detalle de un área piloto dentro de la región basáltica. Pero en una primera parte, a manera de introducción, parece conveniente realizar una síntesis de diferentes aspectos de la unidad geológica, donde se abordaran características geológicas, estructural-tectónico y aspectos relacionados a la vulcanología física. Esta especie de introducción, a manera de síntesis de las características básicas de la Formación tiene una fuerte relación directa e indirecta con la capacidad del cuerpo volcánico de almacenar y circular agua subterránea. En especial los aspectos de la vulcanología física, dado las particularidades de este acuífero volcánico fisurado.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a la Institución por permitir y financiar el presente trabajo. Además agradecer a Andrés Pérez y Roberto Carrión, dos colegas con amplio conocimiento y experiencia en el tema aguas subterráneas, por realizar gentilmente una revisión crítica del texto.

INDICE

1. CONTEXTO GEOLÓGICO-ESTUCTURAL DE LA FORMACIÓN ARAPEY
2. VULCANOLOGÍA FÍSICA DE LA FORMACIÓN ARAPEY
3. IMPORTANCIA DEL ACUÍFERO ARAPEY
4. ESTRUCTURAS FAVORABLES PARA ALMACENAR Y CIRCULAR AGUA SUBTERRÁNEA
5. METODOLOGÍA GENERAL
6. ACUÍFERO ARAPEY – REGIÓN AFLORANTE
6.1. Consumo y puntos de extracción de agua del acuífero Arapey
6.2. Datos hidrogeológicos del acuífero Arapey aflorante
6.3. Calidad y características química del agua del acuífero Arapey
7. ACUÍFERO ARAPEY – ÁREA PILOTO/Región de colonia Artigas
7.1. Aspectos generales y metodología
7.2. Geografía física de la colonia Artigas y alrededores
7.3. Geología de la colonia Artigas y alrededores
7.4. Hidrogeología de la colonia Artigas
7.4.1. Datos hidrogeológicos de la colonia Artigas
7.4.2. Aspectos estructurales básicos de la colonia Artigas y alrededores
7.4.3 Calidad y características química del agua de la colonia Artigas
7.5. Análisis integrado hidrogeológico-estructural de la colonia Artigas
7.5.1. Información, procesamiento y productos
7.5.2. Análisis y discusión
8. MODELO DE FLUJO Y PROSPECCIÓN EN EL ACUÍFERO VOLCÁNICO ARAPEY
8.1. Modelos de flujo : antecedentes (acuífero Arapey y Serra Geral)
8.2. Modelos de flujo : acuífero Arapey-colonia Artigas
8.3. Prospección y ubicación de pozos en el acuífero Arapey
9. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA
10. ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	:	Contexto geológico y extensión de la formación Arapey
Figura 2	:	Aspectos tectónicos-estructurales de la formación Arapey
Figura 3	:	Estimación de la variación de espesor y número de derrames superpuestos de la formación Arapey
Figura 4	:	Estructuras internas típicas de los derrames en la formación Arapey
Figura 5	:	Extensión del acuífero aflorante Arapey y demanda potencial de agua subterránea
Figura 6	:	Demanda potencial de agua subterránea y distribución-densidad de perforaciones que captan agua del acuífero Arapey.
Figura 7	:	Análisis de los datos hidrogeológicos de pozos en el acuífero Arapey
Figura 8	:	Clasificación del agua de perforaciones sobre los acuíferos Arapey y Serra Geral
Figura 9	:	Parámetros físico-químicos del agua subterránea del acuífero volcánico en Uruguay
Figura 10	:	Mapa de distribución espacial de los parámetros físico-químico del agua en el acuífero Arapey
Figura 11	:	Distribución de tipos de suelo sobre de la región del acuífero Arapey aflorante
Figura 12	:	Relieve e hidrografía de la región de la colonia Artigas
Figura 13	:	Carta geológica de la colonia Artigas y alrededores-Anexo
Figura 14	:	Imágenes de los afloramientos del punto geológico 65, contacto colada 1a y 2
Figura 15	:	Imágenes de los afloramientos del punto geológico 28, contacto colada 1b y 2
Figura 16	:	Imágenes de los afloramientos del tope del derrame 2, contacto colada 2 y 3
Figura 17	:	Ubicación de perforaciones para agua en la colonia José artigas
Figura 18	:	Análisis de los datos hidrogeológicos de pozos en la colonia Artigas
Figura 19	:	Mapa de fracturas y de densidad de fracturación de la colonia Artigas y alrededores
Figura 20	:	Direcciones de lineamientos según longitud en la colonia Artigas
Figura 21	:	Estimación de espesor del derrame 2 y ubicación de zonas interderrames
Figura 22	:	Relación espacial entre estructuras verticales-subverticales y perforaciones en la colonia Artigas
Figura 23	:	Diagrama de direcciones de estructuras verticales-subverticales productivas
Figura 24	:	Tipo de estructuras portadoras de agua por pozo en la colonia Artigas

LISTA DE CUADROS Y TABLAS

Cuadro 1	:	Estadísticos de análisis químicos de agua de perforaciones sobre el acuífero Arapey de la empresa OSE
Cuadro 2	:	Parámetros físico-químicos de agua de perforaciones sobre el acuífero Arapey
Cuadro 3	:	Datos químicos promedios del agua subterránea del acuífero volcánico en Uruguay y Brasil
Cuadro 4	:	Características del agua extraídas de perforaciones del acuífero Arapey en la colonia Artigas
Cuadro 5	:	Síntesis de relación espacial entre estructuras, perforaciones y napas
Tabla 1a	:	Descripción de perforaciones de Dinamige-Anexo
Tabla 1b	:	Descripción de perforaciones de Prenader-Anexo
Tabla 2	:	Interpretación de perfiles de pozos de Dinamige y Prenader ejecutados en la colonia Artigas-Anexo
Tabla 3a	:	Datos de perforaciones relevadas en la C. Artigas, ubicación precisa-Anexo
Tabla 3b	:	Datos de perforaciones relevadas en la C. Artigas, ubicación estimada-Anexo

1. CONTEXTO GEOLOGICO-ESTUCTURAL DE LA FORMACIÓN ARAPEY

Durante el Cretácico inferior se produce sobre parte de la plataforma Sudamericana un evento magmático efusivo de escala continental, que literalmente inunda con lava parte de los territorios que hoy ocupan Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. La lava de composición principalmente basáltica cubren casi totalmente las rocas preexistentes, en especial las generados en el paleo-erg de "Botucatu" y que representa en Uruguay la Formación Tacuarembó.

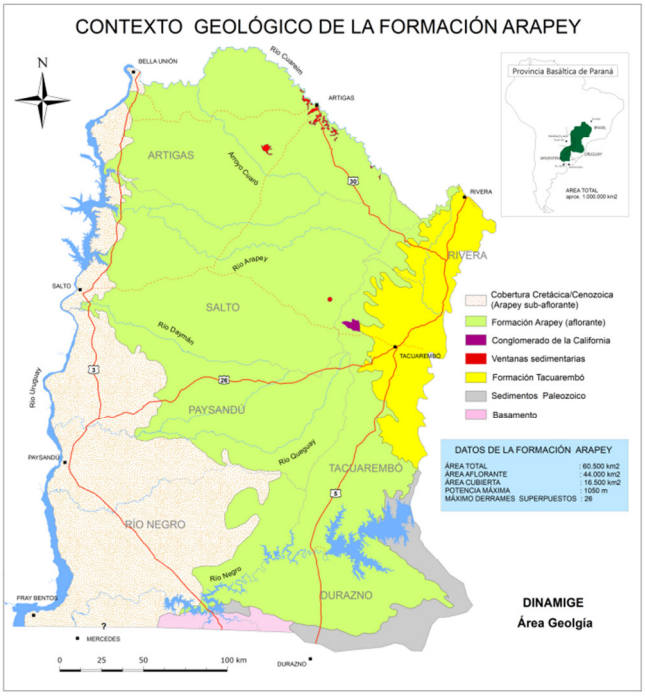


Figura 1 : Contexto geológico y extensión de la formación Arapey.

El material efusivo que se emplaza en forma pasiva sobre el paleo-desierto preexistente, se extienden por un área superior al millón de km^2, con espesores que en Uruguay superan en la región de Salto los 1000 m. Este evento y sus productos se conocen internacionalmente como Provincia Volcánica del Paraná, una de las provincias basálticas continentales más grandes de la historia geológica de la Tierra. Estas rocas efusivas son agrupadas como Formación Arapey en Uruguay y conocidas en Brasil e internacionalmente como Formación Serra Geral.

El área total de la formación Arapey en nuestro País es de aproximadamente 60.500 km^2, de los cuales algo más del 70 %, unos 44.000 km^2, está aflorando y el resto cubierto por algunas decenas de metros de sedimentos Cretácicos-Cenozoicos (Figura 1).

La edad de la Provincia Volcánica del Paraná es motivo de cierta controversia con resultados que presentan gran dispersión, desde 115 a 140 M.a. Las dataciones con métodos más precisos ($^{40}Ar/^{39}Ar$ y U-Pb) indican que por lo menos la mayor parte del vulcanismo (clímax

magmático) ocurrió en un corto periodo de tiempo entre 134-135 Ma. [Baksi A. - 2018; Thiede D. et al - 2010].

La extrusión de lava, a través de múltiples fisuras, se procesó en forma de pulsos, con periodos de calma efusiva, por lo que la pila volcánica final, que puede alcanzar en nuestro País, más de 1 km de espesor e integrada por más de 25 pulsos, está conformada por la superposición de cuerpos groseramente tabulares denominados derrames, flujos o coladas de lava. Si bien en la Provincia de Paraná existen términos ácidos, en Uruguay solo se han descripto rocas efusivas básicas con y sin olivino a intermedias con cuarzo y horblenda. Los escasos análisis químicos indican que se trata de basaltos a andesitas con bajo contenido en titanio. [Bossi J. et al - 1973; Techera J. - 2011]

Algunos datos indirectos parecen indicar que hubo una tectónica importante al menos en parte de la región basáltica, generando desplazamientos verticales de bloques : presencia de bloques graníticos en la formación La California, intercalación de derrames y conglomerados de dicha formación, ventanas sedimentarias en la región nororiental del área basáltica (altos estructurales ?), variaciones importantes en el espesor de la pila volcánica en cortas distancias, áreas de intensa fracturación asociadas espacialmente a grandes estructuras lineales (y posiblemente a levantamiento de bloques) y cambios abruptos lineales en los valores de la anomalía de bouger.

En base a los antecedentes cartográfico-estructurales y al análisis y procesamiento de datos relevados [(1)] se identificó un conjunto de grandes estructuras lineales de dirección general SE-NW. Estos grandes lineamientos, interpretados como fracturas/fallas de gran porte y de direcciones predomínate N40W a N60W, parecen compartimentar a la pila volcánica, estructurando a la unidad Arapey en grandes regiones alargadas en sentido NW (Bloques).

La principal falla es una gran estructura lineal curva, de gran radio, con direcciones N40W al sur y N50W al norte con recorrido de aproximadamente 250 km y que ha sido denominada falla Curtina-Constitución [J. Bossi et al - 1973], falla F3-F4 (este trabajo). Es interpretada como una falla con componente vertical (falla de gravedad y/o rotacional), que produce el levantamiento de la región oriental con respecto a la región occidental. Otra gran estructura lineal es la denominada falla Masoller-Meneses [J. Bossi et al 1973] o F1-F2 (este trabajo) en la región oriental, con una extensión estimada de 160 km y dirección predominante N50-60 W, también, al menos en algunos sectores, presentaría una componente vertical que desplaza los bloques adyacentes. Por ultimo una estructura lineal al sur del área basáltica (F5-F6), que es identificada por varios antecedentes cartográficos pero con poca representación en las imágenes satelitales, con una extensión en el entorno de los 150 km y dirección principal N50-60 W (Figura 2).

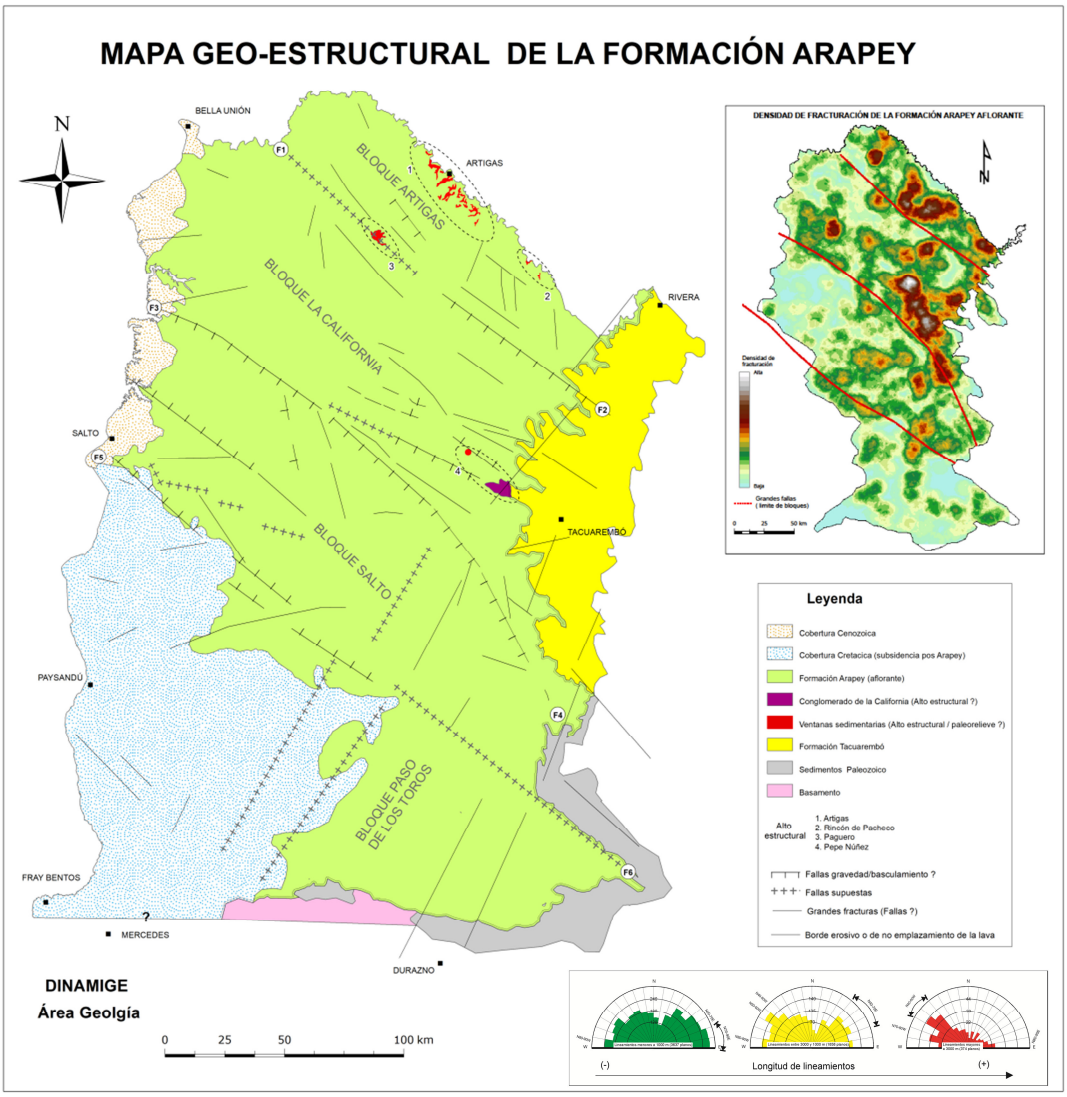


Figura 2 : Aspectos tectónicos-estructurales de la formación Arapey. [(1)] Síntesis, procesamiento y análisis de información cartográfica-estructural (Bossi et al 1969, 1970, 1973, 1998 y 2001; Marmisolle 2015, Precciozzi et al 1985, Soto 2014 y este trabajo).

2. VULCANOLOGÍA FÍSICA DE LA FORMACIÓN ARAPEY

El espesor final de la pila volcánica depende de dos tipos de factores. Por un lado factores pre-sin efusivos, que van desde la taza de extrusión hasta el paleorelieve inicial y factores sin-pos efusivos, como la tectónica y la erosión. Esta combinación de múltiples factores se traduce que la potencia final de la formación Arapey varié en el espacio en función del espesor individual de cada derrame y de la cantidad de derrames superpuestos.

A escala regional el espesor de la pila volcánica y en general del número de derrames superpuestos crece de SE a NW y de E a W, con posibles cambios de espesor abruptos en el entorno de las grandes estructuras lineales mencionas anteriormente. Y en algunas regiones localizadas, como en el entorno de las ventanas sedimentarias (Figura 3).

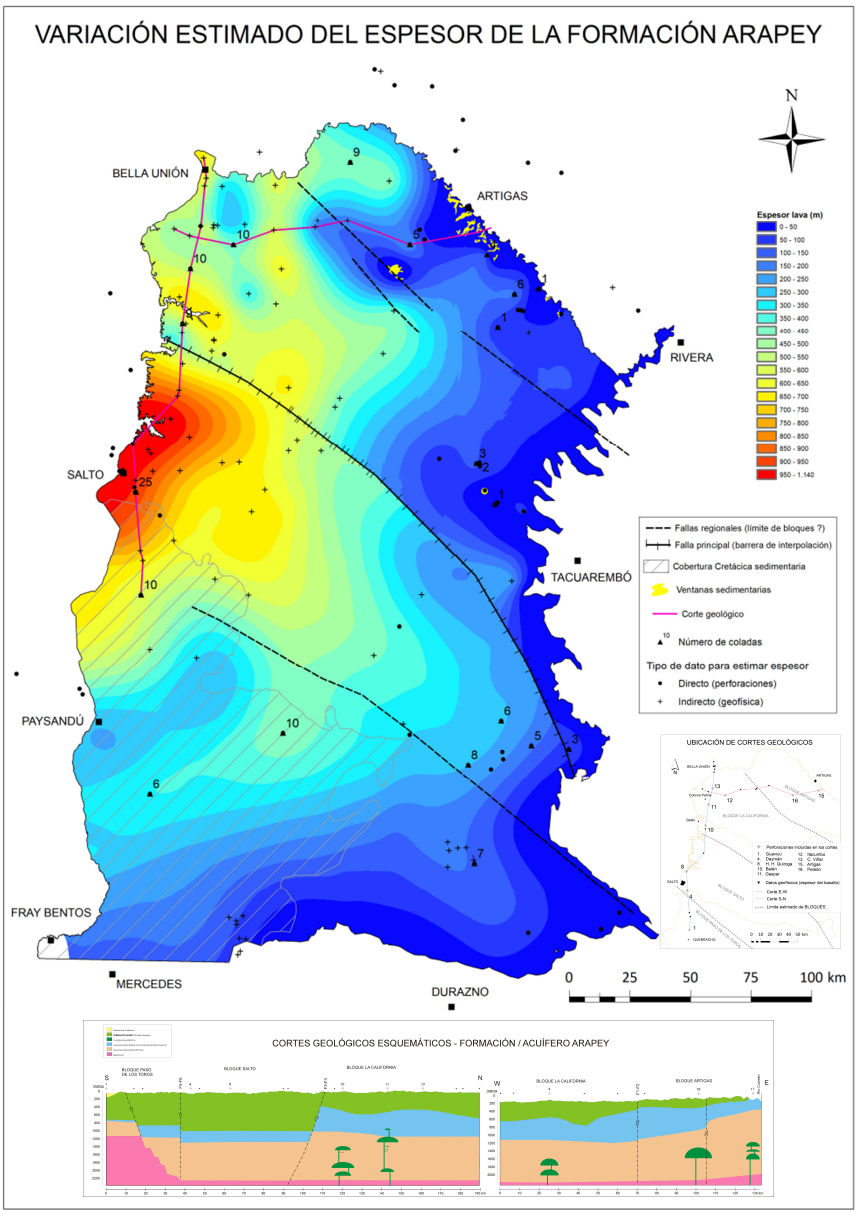


Figura 3 : Estimación de la variación espacial del espesor y número de derrames superpuestos de la formación Arapey. (En base a análisis geo-estadístico de datos de perforaciones de Uruguay, Argentina y Brasil y estimaciones de espesor de basalto en base datos de geofísica).

Las Provincias Volcánicas Continentales (PVC) antiguas como Deccan, Columbia River y Paraná, entre otras, originadas durante la historia geológica de la tierra, están conformadas por la superposición de varios pulsos de lava subaéreos emplazadas sobre corteza continental, con características morfológicas externas y estructura interna particulares.

El crecimiento endógeno y formación de grandes mantos de lava “sheet flows” [Hon K. et al 1994; Self S. et al 1998] sería el responsable de generar los extensos y espesos cuerpos tabulares de lava como los observados en la formación Arapey y otras PVC.

La enorme mayoría de los derrames descriptos de esta unidad geológica pueden ser clasificados como derrames tipo pahoehoe (corteza vesicular superior e inferior continua) o un tipo transicional conocido como pahoehoe con brechas en el tope (rubbly lava flow). [Bossi J. & Schipilov A. 1998; Techera J. et al. 2007].

La forma de emplazamiento, las características fiscas del magma, la tasa de extrusión, el paleo-relieve existente y los procesos internos dentro del flujo de lava (historia de enfriamiento y desgasificación) son responsables de la morfología superficial y de la estructura interna final del cuerpo volcánico una vez enfriado (ver para más detalle Santos Barreto C. et al. - 2014).

Tomando como modelo los perfiles descriptos en el distrito gemológico Los Catalanes (Techera J. et al. - 2007) la estructura interna de cada pulso puede estar integrada por:

- ✓ parte basal o corteza inferior continua, formada por lava de grano fino, tenaz, con porcentaje variable de vesículas aunque en general bajo, con disyunción elíptica a esférica, potencia en general menor al metro. Excepcionalmente se observa fracturas horizontales apretadas en la base (estructura lajosa).
- ✓ zona central o núcleo de la lava, formada por rocas masivas o con vacuolas dispersas, de grano fino a medio, con fracturación irregular tanto en espaciado como en dirección. En algunos derrames se observa hacia la base un "esbozo" de estructura columnar. En varios derrames la parte superior puede contener grandes cavidades vacías o rellenas de minerales secundarios (geodas). Esta zona puede alcanzar varias decenas de metros de espesor.
- ✓ tope de lava o corteza superior, se caracteriza por una roca altamente vesicular, con vacuolas vacías o con relleno de minerales secundarios, con espesor que puede tener hasta 2 m. Asociado espacialmente al nivel vesicular se observa en forma muy frecuente niveles “brechoides” (autobrecha ígnea), formados principalmente por fragmentos (bloques hasta granos) de basalto/andesita vesicular, en una “matriz” en general volcánica.
- ✓ en la parte superior e inferior del derrame es común encontrar distintas “formas” de arenisca, representadas por mantos y dunas de arena (intertrapp) y "ocurrencias" complejas producto de la interacción lava-arena : diques clásticos, brechas ígneo-sedimentarios, "filones" de arenisca inyectados (inyectitos) y formas tipo peperites (Figura 4).

En un mismo derrame y en especial en su parte superior, estas texturas-estructuras pueden variar tanto en sentido vertical como lateral aun en cortas distancias.

Procesos secundarios pos emplazamiento del derrame o al final del vulcanismo son comunes en la formación Arapey. Específicamente alteración meteórica, en especial en los niveles vesiculares que producen cambios físicos en las características de la roca. Y alteración hidrotermal, producto de circulación de fluidos calientes y que pueden afectar todo o parte del

perfil del derrame. Los minerales secundarios de esta alteración hidrotermal son entre otros calcedonia/ágata, cuarzo/amatista, calcita, celadonita y variedades de zeolitas.

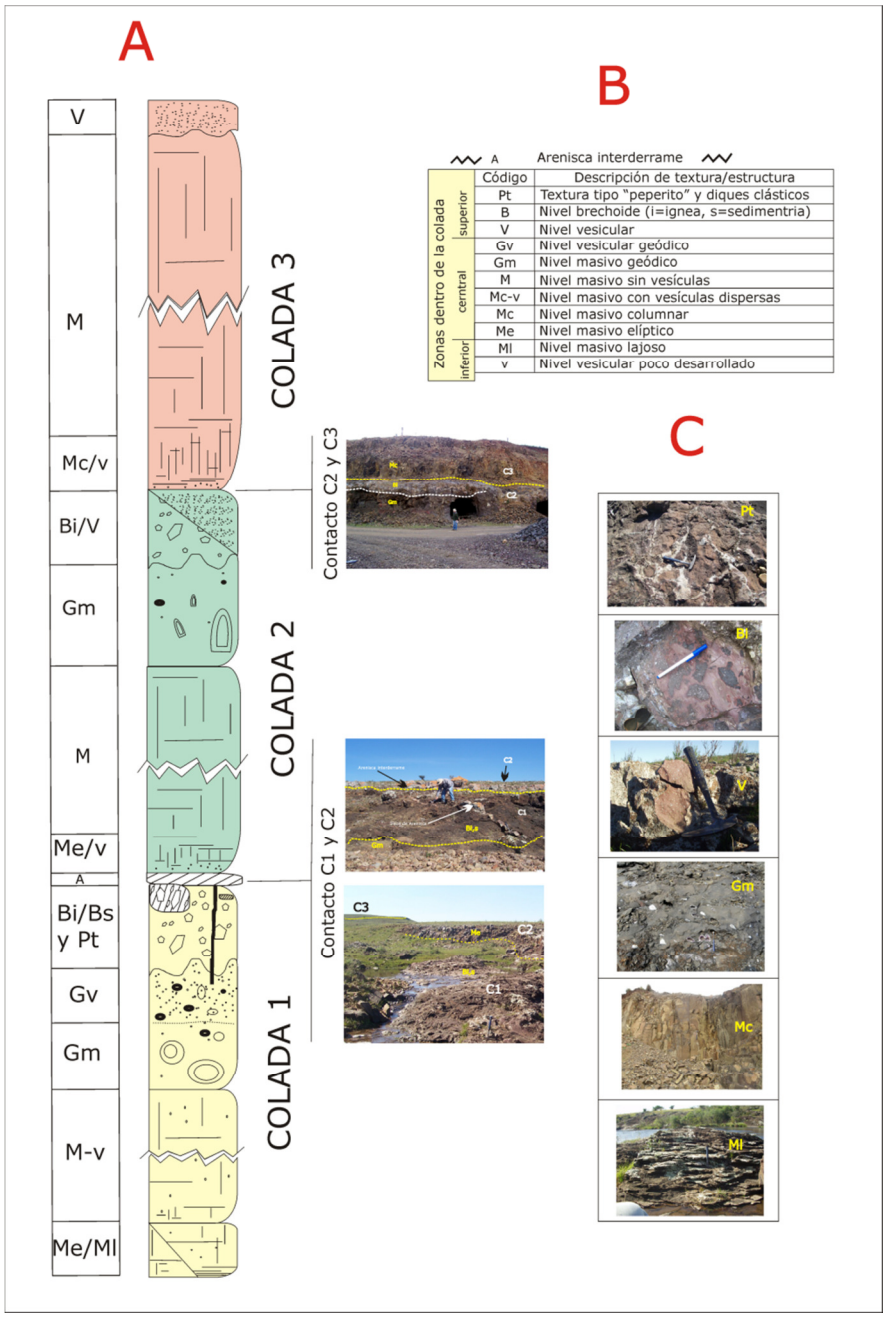


Figura 4 : Estructuras internas típicas de los derrames en la formación Arapey. A : Perfil esquemático de la estratigrafía con la texturas/estructuras internas y contactos entre derrames en la zona la Cordillera (Distrito Gemológico Los Catalanes). B: Códigos utilizados en la figura. C : Fotos de la texturas/estructuras internas de las coladas.

Otro tipo de estructuras como las discontinuidades, en especial presentes en el nivel masivo y vinculadas en muchos casos a los proceso de enfriamiento de la lava, son descriptas en el capítulo 4.

3. IMPORTANCIA DEL ACUÍFERO ARAPEY

La formación Arapey ocupa un área aflorante de más de 40.000 km^2, por lo que representa la unidad geológica y acuífera más extendida del País. Su extensión y espesor hace que el acuífero fisurado volcánico, sea la única posibilidad de obtener agua potable (agua subterránea) para una gran región de los departamentos al norte del Río Negro. La mayor parte es para consumo humano en pequeños poblados, caseríos, centros poblados Mevir, escuelas rurales, colonias de producción agrícola-ganadera y establecimientos de campo. También, aunque en mucha menor medida es utilizada para otros fines, como por ejemplo agua para abrevadero de ganado, en especial en épocas de escases de precipitaciones (Figura 5). Si bien no es un acuífero muy productivo (perforaciones con caudales en general bajos), representa la única fuente de agua "económica" (pozos de poca profundidad) en una extensa región del País. Por lo que consideramos que su estudio y caracterización geológica e hidrogeológica es importante y puede aportar conocimiento para entender mejor el modelo hidrogeológico de circulación de agua en estos acuíferos fisurados volcánicos "estratificados" (derrames superpuestos) y contribuir en lo posible a mejorar los criterios de localización de perforaciones exitosas.

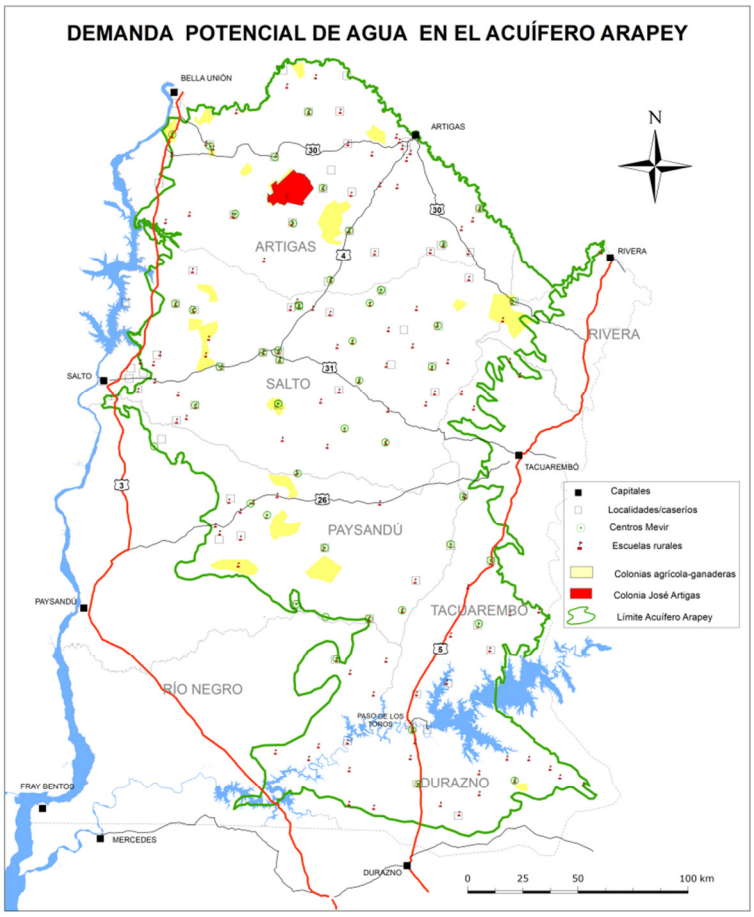


Figura 5 : Extensión del acuífero aflorante Arapey y demanda potencial de agua subterránea.

4. ESTRUCTURAS FAVORABLES PARA ALMACENAR Y CIRCULAR AGUA SUBTERRÁNEA EN ESTE TIPO DE ACUÍFERO

Los acuíferos **fracturadas** o **fisurados** están formados por rocas que almacenan y trasmiten agua a partir de espacios vacíos generados por fracturación. Las rocas ígneas, metamórficas y sedimentos fuertemente litificados forman acuíferos de este dominio hidrogeológico.

El acuífero Arapey, como todos los acuíferos fracturado es heterogéneo y anisótropo, con circulación y almacenamiento de agua subterránea restringida a las zonas fracturadas verticales y subverticales. Por lo que los parámetros hidráulicos y la productividad pueden variar en forma importante en zonas adyacentes.

Un aspecto particular de rocas efusivas básicas de las provincias volcánicas continentales es su estilo de emplazamiento y estructuras internas generadas durante el derrame y enfriamiento de la lava. Este tipo de magmatismo no es continuo, sino que se procesa a manera de pulsos discretos de lava, que generan al enfriarse una unidad volcánica groseramente tabular. El resultado final son campos de flujo o pilas volcánicas conformadas por la superposición de 2 o más derrames cada uno con estructuras internas características (ver sección Vulcanismo Físico-capitulo 2). Por lo tanto además de las estructuras verticales-subverticales, de los típicos acuíferos fracturados, existen estructuras primarias, horizontales-subhorizontales, con el potencial de almacenar y circulación agua.
Las estructuras del derrame y pila volcánica por donde potencialmente puede circular y almacenarse el agua subterránea y agrupada en función de su actitud son:

<u>Verticales a sub-verticales</u> :

- ✓ Fracturas de enfriamiento que se producen por la contracción de la lava y quedan generalmente, restringidos al derrame, en especial en la zona central y base (diaclasas).
- ✓ Discontinuidades tectónica, producidas por esfuerzos post-enfriamiento de la lava (sin y post evento efusivo), generando fallas y fracturas que pueden tener gran desarrollo horizontal y vertical, pudiendo intersecar más de una colada.
- ✓ Regiones con fracturación vertical poco espaciada con padrón regular, generando prismas columnares (zona columnares).

<u>Horizontales a sub-horizontales</u>

- ✓ Contacto entre derrames, en especial con zonas de alteración meteorica y/o con intercalación de sedimentos interderrames.
- ✓ Zonas vesiculares y/o brechoides de los bordes superior e inferior de los derrames.
- ✓ Fracturación horizontal apretada en la base del derrame (basalto lajoso).
- ✓ Fracturación horizontal apretada en el tope del derrame, cerca o dentro de los niveles vesiculares o brechoides.
- ✓ Lava tubos.

Vertical a Horizontal

- ✓ Fracturación con dirección variable y poco espaciada, asociada a un rápido enfriamiento de la lava, generando prismas de forma variada, rectos hasta curvos. (región de entablatura).

5. METODOLOGÍA GENERAL

Dada la enorme extensión del acuífero Arapey y su gran variabilidad hidrogeológica, se abordó el estudio del acuífero en dos escalas distintas y con diferente enfoque. Por un lado a escala regional se ejecutó una recopilación de la información existente del acuífero en toda la región aflorante, como aspectos de uso y consumo de agua subterránea, análisis de datos de perforaciones que captan agua del acuífero y aspectos hidroquímicos.

Para un estudio más detallado, estructural, geológico, hidrogeológico, se seleccionó una pequeña región, que denominamos Área Piloto, que abarca la colonia ganadera José Artigas, en el departamento de Artigas.

6. ACUÍFERO ARAPEY – REGIÓN AFLORANTE

6.1. Consumo y puntos de extracción de agua del acuífero Arapey

El principal uso del agua subterránea que se extrae del acuífero Arapey, es para consumo humano, en pequeños poblados, caseríos, centros Mevir y educativos, colonias agrícolas-ganaderas y establecimientos rurales. En general los volúmenes por punto de extracción son bajos y distribuidos en una gran extensión del norte del País. Sobre el acuífero se han identificado unos 80 localidades y 50 Mevir (con población desde varios miles a algunas decenas de persona). Además de unas 17 colonias agro-ganaderas, cerca de 50 escuelas rurales y población rural dispersa. Sobre el basalto aflorante se estima que viven entre 35 a 40 mil personas, estimación realizada en base a los datos del censo 2011 (INE) y análisis espacial de ubicación de localidades con respecto la región aflorante del acuífero Arapey. Suponiendo un consumo percápita diario de entre 80 a 120 litros por persona, el volumen anual consumido de agua proveniente del acuífero estaría entre 1,3 a 1,5 millones de m^3.

La cantidad de agua extraída del acuífero Arapey solo puede ser estimada en forma muy aproximada, realizando algunas suposiciones y simplificaciones. Para el cálculo se supuso una extracción de 1 m^3 diario para 1152 pozos individuales (pozos privados), unos 10 m^3 diario para los pozos de los 50 Mevir y un régimen de bombeo de 6 horas diarias para los 115 perforaciones de OSE. El valor obtenido, en base a las suposiciones antes mencionadas, es del entorno de 2,7 millones de m^3 por año (Figura 6).

Es interesante observar, que si al valor estimado de agua extraída anualmente del acuífero, se le resta las pérdidas física en la red de distribución de OSE (~ 50 %), el valor efectivo de consumo es de cerca de 1,6 millones de m^3 anuales. Valor muy similar al calculado para el consumo estimado en base a la población que vive sobre el acuífero.

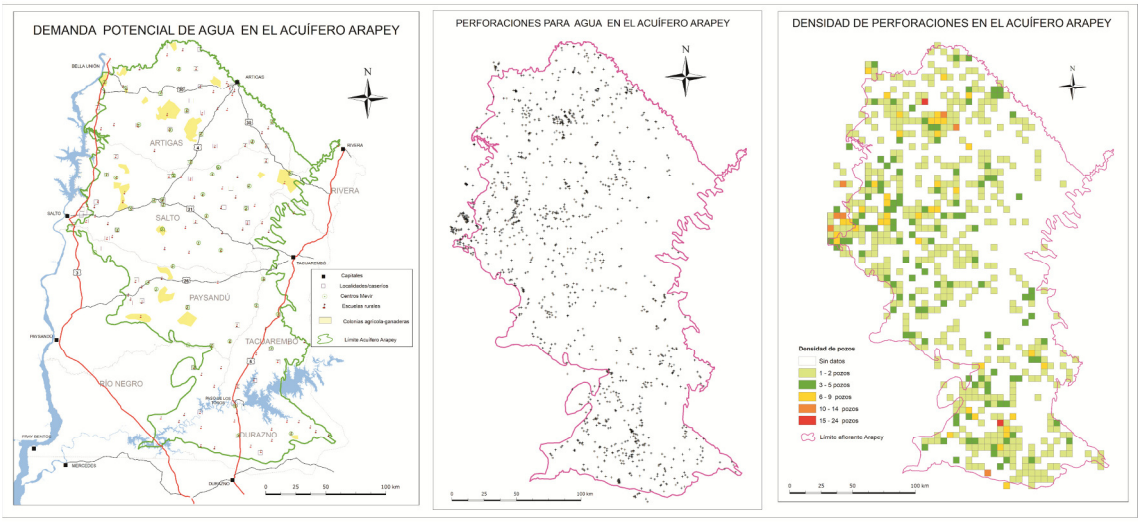


Figura 6 : Demanda potencial de agua subterránea y distribución-densidad de perforaciones que captan agua del acuífero Arapey.

6.2. Datos hidrogeológicos del acuífero Arapey aflorante

En los que respecta a los datos de perforaciones, se realizó un relevamiento de los pozos que extraen agua del "basalto" utilizando diferentes fuentes de información (Dinamige, OSE, Prenader y privados) y se procesó espacialmente con el programa ArcGIS junto con la capa de limite aflorante de Formación Arapey.

Fueron identificados a partir de este relevamiento y procesamiento 1500 perforaciones que extraen o extraían (varios pozos hoy están fuera de servicio) agua de esta unidad hidrogeológica, con información heterogénea en cuanto a tipo de datos disponible. Con la información de las perforaciones con datos (profundidad de pozo y de napa, caudal y descenso) se ejecutó un análisis estadístico básico. Los resultados se presentan en forma de gráfica, con un cuadro estadístico adjunto y breves cometarios :

La mayoría de las perforaciones de un total de 1334 (cerca del 90 %) presentan profundidades iguales o menores a los 70 m, los intervalos más frecuentes son entre 30 y 40 m y entre 20 y 30 m. La media de profundidades es de cerca de los 49 m y la mediana en el entorno de los 40 m (Figura 7A).

La localización de las napas representa la ubicación en profundidad de las estructuras (fallas, fracturas, diaclasas y estructuras primarias) de donde se capta agua subterránea. En el caso de las perforaciones con datos (1009 pozos) las estructuras "portadoras" de agua subterránea se intersectaron a una profundidad máxima de 274 m y una profundidad mínimo de 3 m. Estas estructuras se localizaron entre los 38 m (promedio) y 29 m (mediana). Para la mayoría de los pozos (~90 %), las estructuras portadoras se ubican a menos de 75 m, siendo los intervalos más frecuentes 10 a 20 y 20 a 30 m (Figura 7B).

En cuanto a los caudales de 1285 perforaciones, se registraron un máximo de 53 m^3/h hasta un mínimo de 0,1 m^3/h, siendo el valor promedio de 4,8 m^3/h y la mediana de 3,3 m^3/h. Si bien existe cierta dispersión en los caudales, la mayoría (más del 70 %) de los pozos presenta caudales menores 5 m^3/h y la enorme mayoría (más del 90 %) los caudales son menores a 10 m^3/h. Del total de perforaciones relevadas, cerca del 11 % son pozos secos (Figura 7C).

Por último los caudales específicos, que representa la relación entre volumen de agua extraído por unidad de descenso, es un buen indicador de la productividad de las perforaciones. De los 365 perforaciones relevadas con datos suficientes para el cálculo de este parámetro, más del 50 % presentan valores de caudal específico menor a 1 m^3/h/m y más del 80 % menor a 5,0 m^3/h/m, siendo el intervalo más frecuente < 0,10 m^3/h/m . El valor más alto encontrado fue de 6,25 m^3/h/m y el menor de 0,003 m^3/h/m, siendo el promedio 2,6 m^3/h/m y la mediana 0,4 m^3/h/m, lo que muestra la gran dispersión de los datos (Figura 7D).

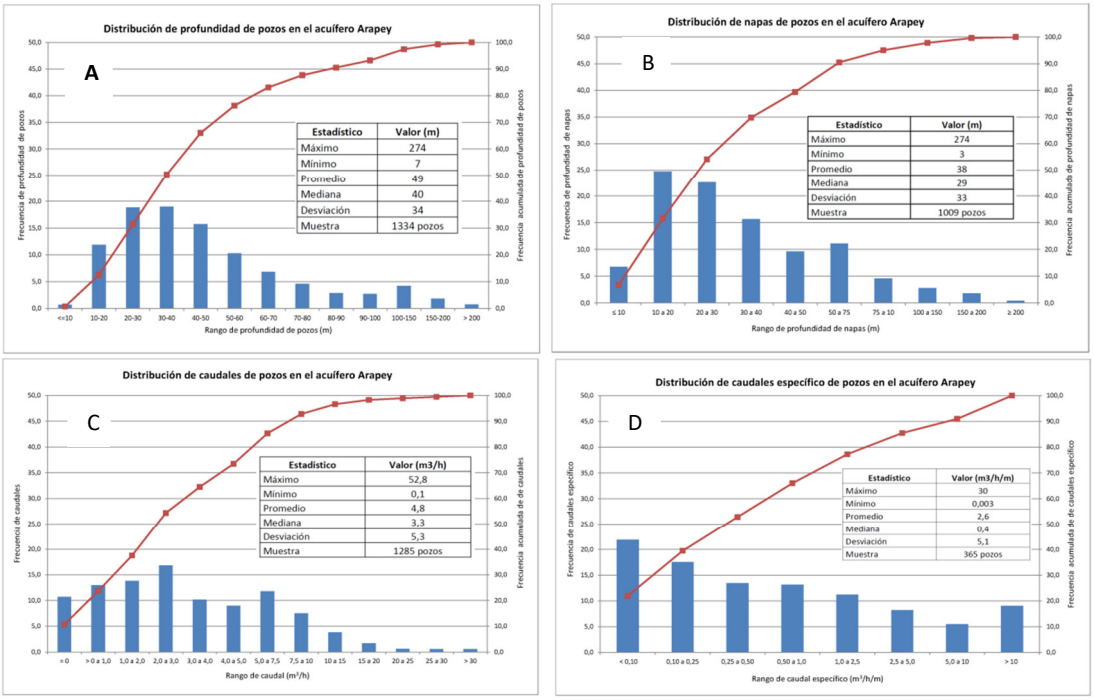


Figura 7 : Análisis de los datos de profundidad de pozos, de napa, caudal y caudal especifico de perforaciones que extraen agua de la unidad Arapey.

6.3. Características y calidad del agua en el acuífero Arapey

La información físico-química disponible del agua que se extrae a nivel de todo el acuífero Arapey es escaza y con datos parciales. La misma proviene de análisis de agua de algunos puntos de extracción de la red de pozos de OSE ubicados sobre el acuífero volcánico. También se cuenta con datos químicos y físicos de algunos pozos ubicados en una pequeña área en el margen oeste del basalto aflorante [Consur - 1995 y Abelenda E. - 2016].

En base al procesamiento y análisis de esta información se puede hacer algunas consideraciones en cuanto a la calidad y características fisico-química del agua subterránea del acuífero Arapey.

La calidad del agua para consumo humano es regulada por normas que definen ciertos valores máximos admitidos denominados VALORES MAXIMOS PERMITIDOS (VMP). Estos VPM tienen diferente significado según el parámetro/elemento que se analice y pueden agruparse en dos categorías. Sustancias y parámetros que solo afectan las propiedades organolépticas del agua cuando están por encima del VPM. Y sustancias que por encima de este umbral máximo admitido pueden ser peligrosas para la salud humana. Dentro de la primera categoría están parámetros como la dureza y la conductividad, y elementos como los cloruros, sodio, hierro, etc. Y dentro de la segunda se incluyen arsénico, flúor, metales pesados, etc. Las normas de referencia para la calidad del agua que utiliza OSE es la norma UNIT 833:2008, que son muy similares a las guías de la Organización Mundial de la Salud, tercera edición.

	Cl (mg/L)	$N0_3$ (mg/L)	SO_4 (mg/L)	F (mg/L)	Na (mg/L)*
Máximo	75	48	88	2,9	209
Mínimo	3	2	10	0,5	11
Desviación	16	9	19	0,6	43
Promedio	23	12	20	0,9	49
Mediana	20	9	13	0,7	35
Muestras > LD	41	66	27	20	28
Muestras < LD	24	9	30	47	0
Total muestras	65	75	57	67	28
VMP	250	50	400	1,5	200
Cantida > VMP	0	0	0	2	0

Elemento*	Total mustras	Cantidad < LD	Cantida > LD	VMP	Cantida > VMP
Fe mg/L	28	28	0	0,3	0
Mn mg/L	28	28	0	0,1	0
Pb mg/L	28	28	0	0,03	0
Cd mg/L	28	28	0	0,003	0
Cr mg/L	28	28	0	0,05	0
Se mg/L	28	28	0	0,01	0
Cu mg/L	28	28	0	1	0
As mg/L	25	22	3	0,02	0
Zn mg/L	26	22	4	4	0

Cuadro 1 : Estadísticos de análisis químicos de agua de perforaciones sobre el acuífero Arapey de la empresa OSE. (Cada muestra representa una pozo / LD límite de detección / VMP ver texto / * solo datos del dpto. de Artigas)

Los datos analíticos procesados de algunos elementos químicos indican que el agua del acuífero es en líneas generales de buena calidad y apta para consumo humano (Cuadro 1 y 2). Sin embargo algunos puntos de extracción pueden presentar valores de flúor relativamente altos e inclusive unos pocos casos con valores por encima del VMP. La existencia de flúor en el acuífero volcánico, en valores altos, es conocida también en varias regiones de Brasil [Nanni, A. S.-2008]

En lo que respecta a los parámetros físico-químico y su relación con la calidad del agua se procesaron 4 parámetros del agua extraída por OSE en perforaciones sobre basalto y de perforaciones en los alrededores de Salto : dureza total, conductividad eléctrica, alcalinidad total y pH. En general el agua del acuífero Arapey cae en el campo de aguas duras y con

moderada a alta alcalinidad y conductividad. Se trata de aguas neutras, con pH en el entorno de 7. Todos los parámetros antes mencionados están por debajo del VMP, que en este caso es un valor que se establece considerando las propiedades sensoriales del agua (Cuadro 2).

DATOS FISICO-QUÍMICOS DEL ACUÍFERO ARAPEY													
REGIÓN	ESTADÍSTICO	Sólidos Totales (mg/L)	Alcalinidad Total (mg/L $CaCO_3$)	Dureza (mg/L $CaCO_3$)	CE uS/cm	pH	Calcio (mg/L)	Magnesio (mg/L)	Sodio (mg/L)	Potasio (mg/L)	Bicarbonato (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
1_Salto [1]	Máximo	660	314	378	716	7,8	142	22	61	2,7	383	29,8	22,4
	Mínimo	346	226	175	405	7,1	51	3,6	6,7	1,1	276	2,5	3,5
	Mediana	448	265,5	245	523	7,4	79	12,9	24,1	1,6	324,5	6,4	8,0
2_Salto [2]	Máximo	--	--	--	648	7,6	96,3	27,1	41,7	2	434,4	28,3	84,7
	Mínimo	--	--	--	343	7,0	5,71	6,5	38,5	1,8	269,6	12,1	18,6
	Mediana	--	--	--	539	7,3	66	16,25	40	1,9	312,4	18,2	62,5
Norte Uurguay [3]	Máximo	--	433	431	1121	8,2	--	--	209	--	--	75	88
	Mínimo	--	66	55	137	6,5	--	--	11	--	--	2,6	10
	Mediana	--	263,5	241	589	7	--	--	35	--	--	20	13
Cantidad total de Muestras		14	88	93	112	112	24	24	52	24	24	89	81
VMP		1000	--	500	1300	6,5-8,5	--	--	200	--	--	250	400
Muestras > VMP		0	--	0	0	0	--	--	1	--	--	0	0
Datos procesados de Abelenda-2014 [1], Consur-1995 [2] y OSE [3]													

Cuadro 2 : Parámetros físico-químicos de agua de perforaciones sobre el acuífero Arapey, procesados de datos de la empresa OSE, Consur-1995 y la tesis de Abelenda-2014. (Cada muestra representa una pozo / VMP ver texto)

Para la caracterización del agua del acuífero Arapey se cuenta solo con información parcial de OSE para toda la región aflorante y datos completos de la región de Salto [Consur-1995 y Abelenda E. -2016].

En base a los datos de la región de Salto, la relación de cationes y aniones mayores indica que las aguas del acuífero en los alrededores de la ciudad de Salto se corresponden con aguas de facie bicarbonatada cálcica y bicarbonatada cálcico-magnesiana.

Los datos de OSE no tienen determinación de Ca^{+2}, Mg^{+2} y HCO_3^- y solo se cuenta con el contenido de sodio en las perforaciones del departamento de Artigas, lo que no permite realizar una caracterización hidroquímica confiable de toda la región aflorante del acuífero. Pero realizando ciertas simplificaciones y suposiciones, a partir de los datos de dureza y de alcalinidad (estimación aproximada de calcio, magnesio y bicarbonato) y con la información disponible del resto de los iones mayores, se realizó un análisis del agua del acuífero Arapey en el departamento de Artigas.

Los resultados indican que la mayoría de las perforaciones analizadas (más del 70 %) se corresponden con aguas de facie bicarbonatada cálcica y magnesiana. Y al igual que para el agua de la zona de Salto, presentan en general altos contenidos de dureza (Ca^{+2}, Mg^{+2}) y alcalinidad (~HCO_3^-). Por otra parte, un grupo menor de muestras se localiza en el campo de las aguas bicarbonatadas sódicas y potásicas. Estas muestras tiene la particularidad de presentar baja dureza y alcalinidad, alto pH relativo, muy alto valores de sodio (de 3 a 4 veces la media) y en general altos valores relativos de sulfato y cloro. En base al análisis anterior se puede afirmar que existirían por lo menos 2 familias de agua subterránea en el acuífero Arapey. Por un lado la facie típica o predominante bicarbonatada cálcica y magnesiana con estimado alto contenido de calcio±magnesio (?) y bicarbonato (?) (facie de alta dureza). Y otra facie bicarbonatadas sódicas y potásicas con baja dureza y alto a muy alto sodio (facie alta en sodio)

(figura 8). La primera, facie de aguas duras, sería el producto natural de la interacción del agua de lluvia (recarga directa) y roca volcánica almacén, con tiempo de residencia variable. Las aguas ricas en sodio (bicarbonatadas sódicas) podrían corresponder a aguas profundas con alto tiempo de residencia o más probable al resultado de la entrada y mezcla de agua "profunda" originada por recarga ascendente del acuífero infrayacente.

La conexión hidráulica entre el acuífero volcánico y acuíferos infrayacentes (Guaraní y Pérmicos) estaría controlada por la presencia de grandes estructuras tectónicas verticales y una relaciones potenciométricas adecuadas que permiten el ascenso de aguas subterráneas profundas ricas en fluoruros y otros elementos como Na^+, Cl^- y SO_4^{-2} [Athayde B. G. et al. - 2007; Reginato P. et al. - 2010 y 2013; Manases F. et al. - 2011].

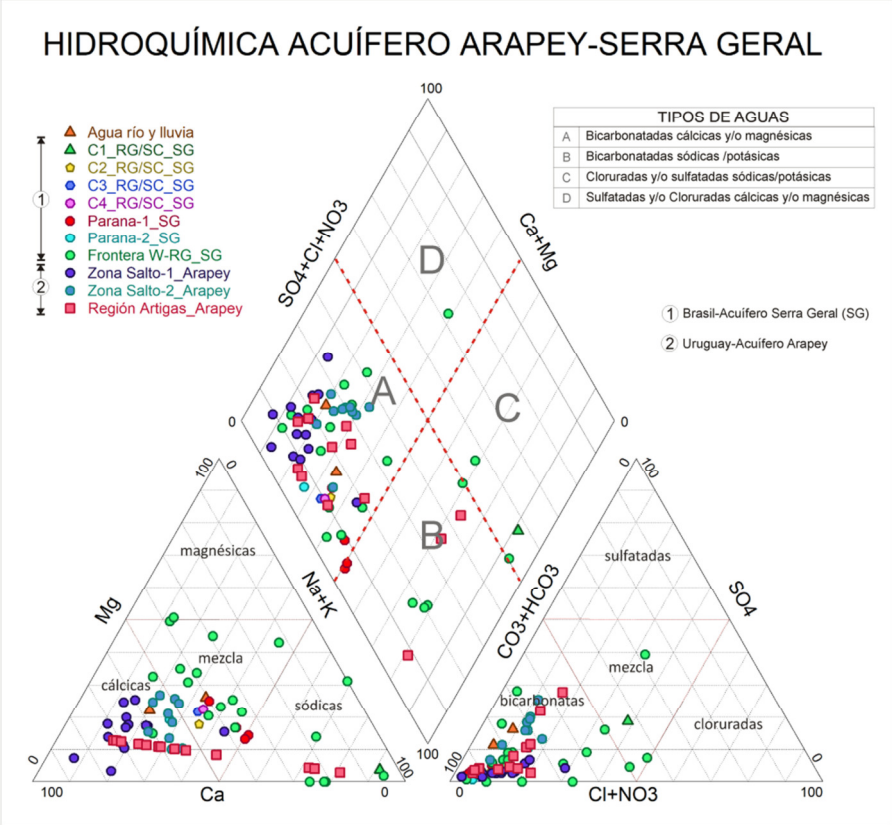


Figura 8 : Clasificación de agua de perforaciones sobre el acuífero Arapey (Zona de Salto y Región de Artigas) y agua de perforaciones sobre el acuífero Serra Geral (región de Rio Grande do Sul/Santa Catarina (RG/SC), Paraná y Frontera W). Ver texto para más detalle.

También se realizó una comparación de las características hidroquímica del agua subterránea captada en el acuífero volcánico en Uruguay (Arapey) y el acuífero volcánico (Serra Geral) en las regiones cercanas de Brasil (estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina y Paraná).

La información química del agua de Brasil fue recopilada de varios trabajos publicados por investigadores brasileros, cuyos resultados son presentados en forma de valores promedios (Carta das águas subterrâneas do Paraná - 2015 / Fraga C. - 1986 / de Freitas M. et al - 2016).

Además se recopilo información de la base de datos hidrogeológica SIAGAS de la CPRM (Servicio Geológico de Brasil). En este caso la información química del agua del acuífero Serra Geral corresponde a la región conocida como "Frontera Oeste" (municipios de Quarai, Barra do Quarai, Uruguaiana y Santana do Livramento).
Los datos químicos del agua del acuífero volcánico de Brasil y Uruguay fueron procesados y se sintetiza la información relevada en el siguiente cuadro.

COMPARACIÓN DE LA QUÍMICA DEL AGUA EN EL ACUIFERO SERRA GERAL/ARAPEY EN LAS REGIONES DE RIO GRANDE DO SUL, SANTA CATARINA, PARANA, SALTO y NORTE DE URUGUAY								
	Región	**Parana_1 (1)**	**Parana_2 (2)**	**RGDS y SC (3)**	**Frontera W (4)**	**Uruguay_Salto (5)**	**Uruguay_Salto (6)**	**Uruguay norte (7)**
	Cantida de muestras	*343*	*205*	*356*	*20*	*10*	*14*	*92*
PARAMETROS FISICOQuíMICOS	pH	7,2		7,5	7,7	7,3	7,4	7,2
	CE(µS/cm)	162		163	417,0	538,8	523	588
	Alcalinidade total	73			205,5		265,5	264
	Dureza total	54,5		61	152,0		245	241
	TDS	143		173,5	325,0		448	
IONES	Sodio	8,5	15,6	25,7 (Na+K)	58,7	40,0	24,05	35
	Potasio	0,6	0,8		1,0	1,9	1,55	
	Calcio	15,2	11,1	16,3	29,5	66,0	79	
	Magnesio	3,3	2,9	4,5	16,8	16,3	12,85	
	Bicarbonato	83,7	71,8	108,9	185,1	312,4	324,5	
	Cloro	1,7	2,3	13	21,1	18,2	6,4	20
	Sulfato	0,5	1,6	6,8	22,5	62,5	7,95	13
	Flúor	0,1		0,3	0,6			0,7

Datos en mg/L. Fuentes : (1) Carta das águas subterrâneas do Paraná – 2015 / (2) Fraga C. -1986 / (3) de Freitas M. - 2016 / (4) SIAGAS / (5) Consur - 1995/ (6) Abelenda E.-2014/ (7) OSE. Valores promedios. (RDGS=Rio Grande do Sul, SC=Santa Catarina, Frontera W del estado de RGDS)

Cuadro 3 : Datos químicos promedios del agua subterránea del acuífero volcánico en Uruguay y Brasil.

Al igual que en el acuífero Arapey, las aguas predominantes o típicas del acuífero Serra Geral en las regiones cercanas de Brasil son bicarbonatadas cálcicas ± magnesias y en forma subordinada bicarbonatadas sódicas y mezclas de agua (Figura 8). Pero en término absolutos, cuando comparados los datos químicos entre las dos regiones del acuífero volcánico de Uruguay y Brasil se encuentra diferencias significativas. Estas diferencias importantes se evidencias mejor cuando se compara los parámetros fiscos-químicos entre ambas regiones. En promedio los valores de conductividad, alcalinidad y dureza son varias veces mayor en el agua del acuífero volcánico en Uruguay que en su equivalente de Brasil. Además si consideramos por separado los datos del agua de la frontera oeste de Rio Grande do Sul, estos son más similares a los de acuífero volcánico en nuestro País que al promedio de acuífero Serra Geral (Cuadro 3).

Si consideramos que el tipo de agua predominante cálcica y cálcica-magnesiana es el resultado de la interacción agua-roca volcánica y su evolución natural dentro del sistema, la importante mineralización del agua en el acuífero Arapey debería estar vinculada a aspectos geológicos en un sentido amplio. Los aspectos geológicos que promueve la gran liberación de iones al sistema acuífero pueden ser múltiples : química-mineralogía del basalto y textura/estructura de la roca, estructuras internas del derrame, etc.. Y además tendría que ser un factor regional, ya que los valores altos de dureza y conductividad se dan en casi todo el agua del acuífero Arapey.

También la cantidad y distribución de los minerales secundarios podrían estar jugando un papel importante en las características bien diferentes entre ambas regiones.
Son conocidos la existencia en la formación Arapey/Sera Geral de una gran cantidad de minerales secundarios en los derrames volcánicos, en especial en los niveles vesiculares. Los procesos de formación postulados son varios, pero el más importante sería la alteración hidrotermal, promovida por el ascenso de fluidos de unidades infrayacentes a la pila volcánica. Dentro de los minerales secundarios, se destacan por su abundancia los minerales del grupo de la sílice, minerales del grupo de las zeolitas (en especial zeolitas cálcicas) y calcita [Frank H. T. - 2008]. Sean los minerales secundarios el responsable de la alta dureza, alcalinidad y conductividad u otro(s) factor(es), el mismo tiene que ser más importantes en la región de Uruguay que en Brasil, en términos cuantitativos y de extensión.

Como ya se mencionó los valores de los parámetros fisicos-químicos en el agua del acuífero Arapey son altos, en la enorme mayoría de los pozos relevados. La mayor parte de las muestras, de un total de 83, cae en el campo de las aguas duras y más del 50 % son aguas duras o muy duras. Cerca del 70 % de las muestras tiene valores de conductividad eléctrica igual o mayor a 500 µS/cm. Los valores de alcalinidad también son relativamente elevados, siendo en general mayor a 100 y cerca del 70 % mayor a 200. (Figura 9 y Cuadro 2)

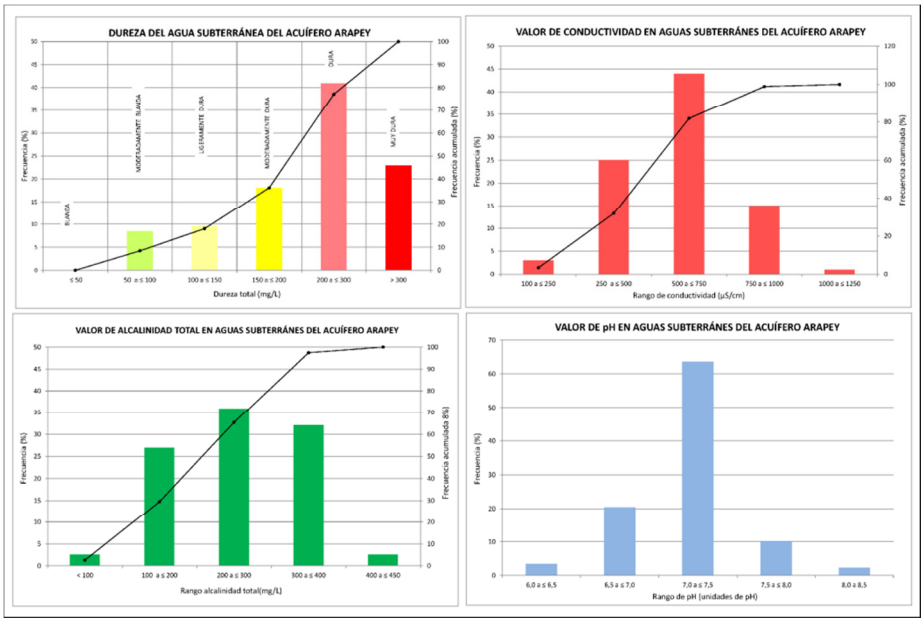


Figura 9 : Parámetros físico-químicos del agua subterránea del acuífero volcánico en Uruguay.

Pero estos valores altos no se presentan distribuidos en forma aleatoria en la región del acuífero, sino que existe cierto padrón de distribución, en donde la tendencia es para todos los parámetros analizados el aumentar su valor desde las región Este hacia la región Oeste.

En los mapas de la figura 10, se observa este padrón de variación espacial para pH, dureza, conductividad y alcalinidad, así como la distribución de las perforaciones de OSE utilizados en el procesamiento geostadístico.

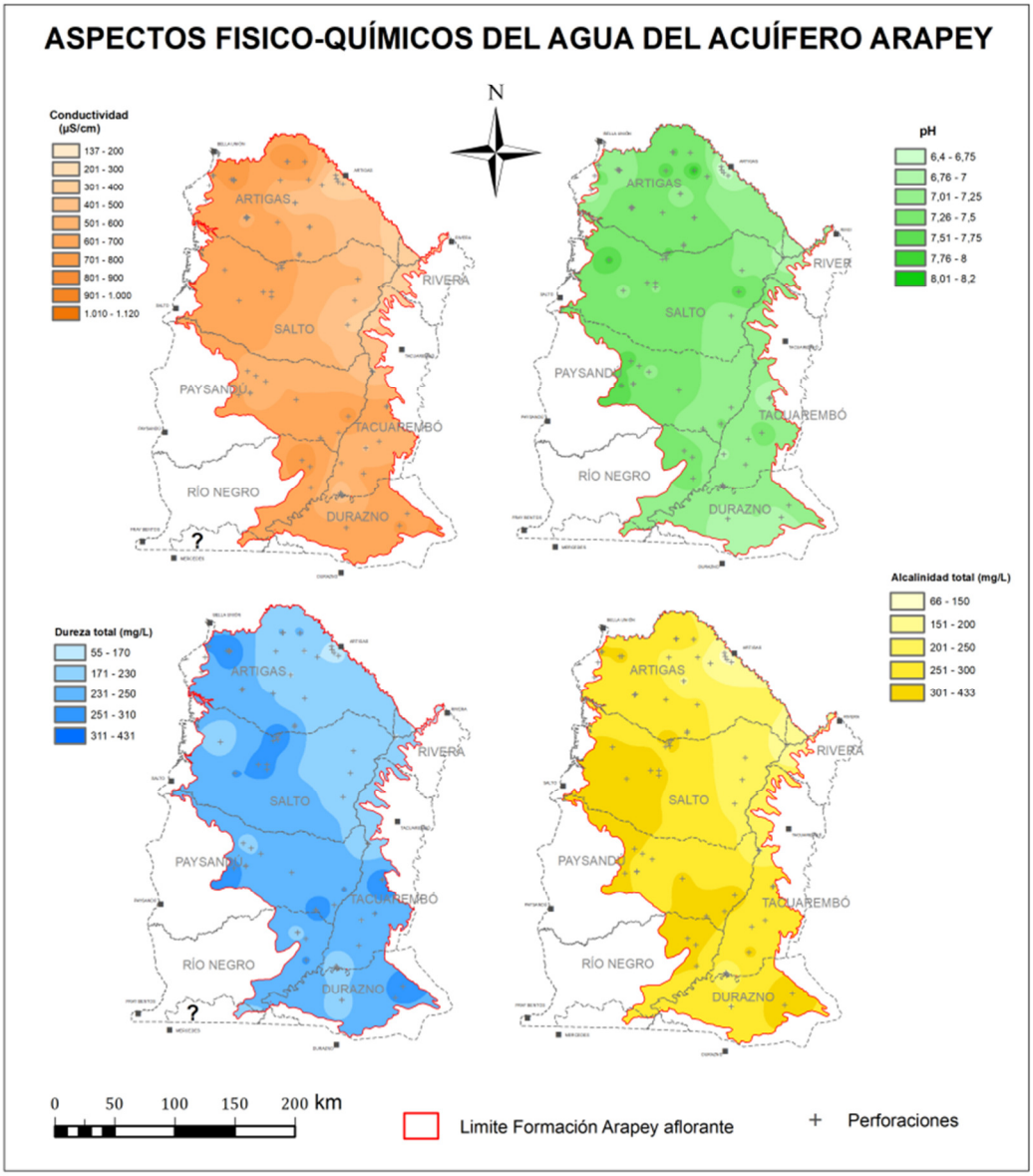


Figura 10 : Mapa de distribución espacial de los parámetros físico-químico del agua en el acuífero Arapey.

Es lógico pensar que el o los factores que controlan este aparente padrón de variación en el espacio de los parámetros físico-químicos del agua subterránea, también tendrían que tener una distribución espacial algo similar. Además es posible que el o los factores "geológicos" responsables de la fuerte mineralización de las aguas puedan ser el o los mismos que origine este padrón de distribución espacial.

También el tipo y distribución de suelos podría ser un factor modificador importante. El acuífero Arapey es un acuífero libre y la recarga se produce en forma directa con la entrada de agua al sistema por infiltración del agua de lluvia a través del perfil edáfico.

El suelo puede ejercer un importante control en las características químicas del agua que llega al sistema acuífero (recarga). Aportando sales minerales y sustancias como ácidos inorgánicos y orgánicos que pueden aumentar la capacidad de ataque del agua a los minerales de la roca almacén [Da Silva A. B. - 1984; Szikszay M. - 1993].

Sobre la región basáltica se desarrollan diferentes tipos de suelos, conocidos informalmente como suelos sobre basalto superficial (unidades de suelo Cuchilla de Haedo-Paso de los Toros y Queguay Chico), intermedio (unidades de suelo Curtina y Masoller) y profundo (unidades de suelo Arapey, Baygorria, Cuaró y Itapebí-Tres Arboles). Los suelos sobre basalto superficial son poco espesos, apoyados directamente sobre el horizonte C o R y predominan los Litosoles. Ya los suelos intermedios y los profundos son más desarrollados, con mayor materia orgánica, limo-arcilla y predominan los Brunosoles y Vertisoles [Berretta E. J. - 1998]. En forma aproximada la distribución de los tipos de suelo, presenta un padrón de distribución algo similar al de los parámetros físico-químicos antes mencionados. Los suelos sobre basalto superficial predominan en la región este y hacia el centro y oeste de la región basáltica predominan los suelos intermedio y profundos (Figura 11).

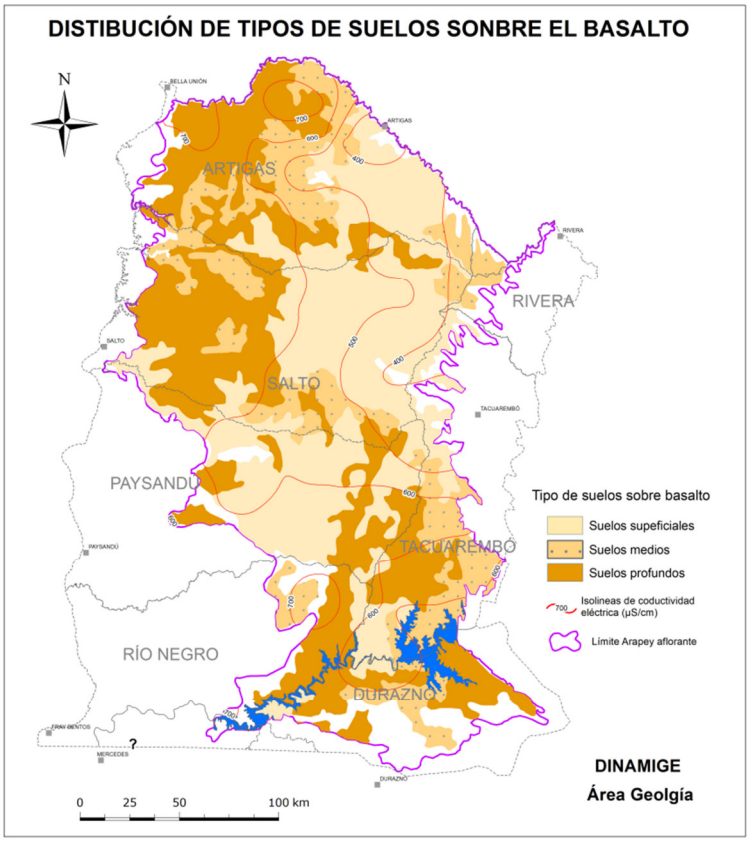


Figura 11 : Distribución de tipos de suelo sobre de la región del acuífero Arapey aflorante. (modificado de la carta de suelo del Uruguay, MGAP 1976)

7. ACUÍFERO ARAPEY – AREA PILOTO/Región de colonia Artigas

7.1. Aspectos generales y metodología

En una pequeña área (Área Piloto) se ejecutaron varios trabajos de detalle, que pretenden encontrar alguna relación entre la existencia de aguas subterráneas, sus caudales y niveles de aporte con las discontinuidades verticales-subverticales y estructuras horizontales generadas por la forma de emplazamientos de este tipo de magmatismo. El área piloto seleccionada coincide con la colonia del Instituto de Colonización José Artigas. Esta región, sobre basalto aflorante, se eligió por varios motivos, pero principalmente por tener una importante cantidad de perforaciones en una pequeña área. Además varios pozos fueron ejecutados por Dinamige, por lo que se tiene, además de la información hidrogeológica, datos del material atravesado.
La colonia José Artigas, se ubica a unos 10 km al S-SE del Poblado Paso Farías en el departamento de Artigas, teniendo como límite oriental, el arroyo Cuaró Grande (ver figura 5). La colonia tiene un área total de unas 21.150 hectáreas (211 km^2) y está "fraccionada" en unas 47 unidades productivas de un promedio de 450 hectáreas cada fracción. Se asienta en general sobre suelos pobres, poco desarrollados conocidos informalmente como suelos sobre basalto superficial. La principal actividad productiva es ganadera en especial la cría de ovinos.
Dentro de las tareas que es ejecutaron para el estudio de detalle se incluyen :

- ✓ Fotointerpretación de fotos aéreas 1:20.000 del área piloto, con separación de derrames, identificación de principales lineamientos y puntos de observaciones a realizar en el campo (posteriormente georeferenciamiento de las fotos).
- ✓ Fotointerpretación de imágenes satelitales de alta resolución: Bing, Google Earth y ArcGIS.Imagery. Digitalización de fotolineamiento y tratamiento espacial de los mismos.
- ✓ Construcción de base de datos de perforaciones de la colonia y alrededores. Análisis de datos hidrogeológicos.
- ✓ Descripción de perforaciones testigadas de la colonia y alrededores del archivo de pozos de Dinamige : relación texturas/estructuras, nivel de agua, productividad del pozo.
- ✓ Etapa de campo, identificación y ubicación precisa de perforaciones de los antecedentes. Observaciones geológicas en puntos predefinidos en base a la fotointerpretación.
- ✓ Procesamiento e interpretación de los datos y elaboración de informe y mapas.

7.2. Geografía física de la colonia Artigas

El área que ocupa la colonia J. Artigas y alrededores está conformada por planos sub-horizontales a lomadas muy suaves con pendientes menores a los 3˚, de dirección de pendiente general de sur a norte. Las alturas máximas se localizan en el sur, con cotas entre

150-160 m s.n.m y las menores cotas en el norte con valores entre 70-90 m s.n.m. Los principales cursos de agua (zanjas y cañadas) corren en sentido de S a N, hacia la confluencia del Arroyo Cuaró Grande. La excepción es el arroyo Yucutujá, que forma parte de la cuenca del río Cuareim, que corre en dirección SE a NW, separado de la cuenca del Cuaró Grande por la cuchilla de Yucutujá (principal interfluvio del área). La geomorfología e hidrografía del área está controlada principalmente por aspectos geológicos y estructurales. Los planos y lomadas suaves, se relaciona a la presencia de cuerpos de lava groseramente tabular y sub-horizontal (derrames). La red de drenaje es mayormente, controlada por las fracturas y fallas que actúan como zonas lineales de mayor debilidad y que resultan en direcciones preferencial por donde circula el agua. En general en la zona sur los cursos de agua menores están encajonados en la roca y desarrollan hacia la zona norte pequeños valles y algunas terrazas. A excepción del arroyo Cuaró Grande que presenta un importante valle, formado por aluviones y limitado por coluviones hacia las zonas altas. Pequeños resaltes a manera de cornisas, con pendientes mayores a 3˚ se desarrollan especialmente al sur del área y se interpretan como niveles métricos horizontales, más resistentes a la erosión. Estos niveles más tenaces se localizan en la parte superior de algunos derrames y están formados por basalto vesicular/brechoide con fragmentos de areniscas (Figura 12).

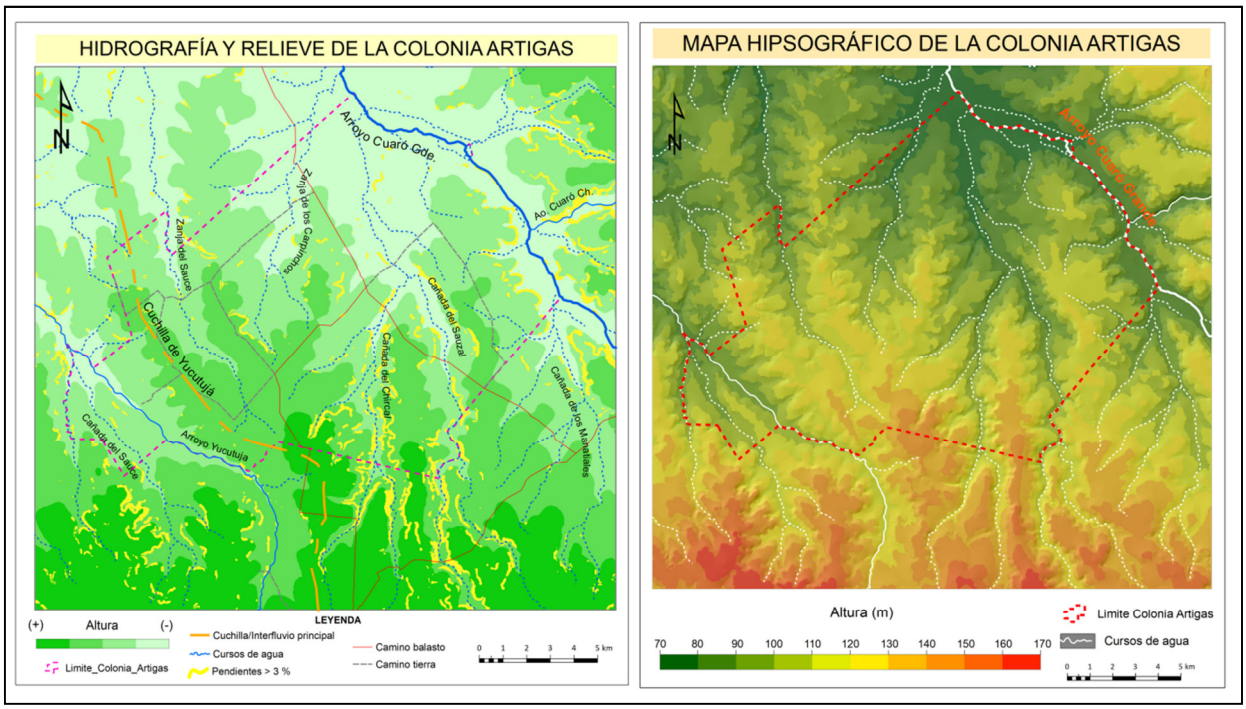


Figura 12 : Relieve e hidrografía de la región de la colonia Artigas.

7.3. Geología de la colonia Artigas y alrededores

El espesor y el número de derrames en la región de la colonia Artigas no es conocido ya que no existen perforaciones en la zona que atraviesen toda la pila volcánica. Solo es posible hacer algunas estimaciones.

Por un lado la estimación del espesor, realizado en base al tratamiento geoestadístico de datos directos e indirectos de toda la formación Arapey aflorante, indican que para la zona de la colonia, el espesor del basalto estaría entre los 200 a 300 m, con por lo menos 5 derrames superpuestos y aumenta de NE a SW (ver Figura 3). Usando datos directos podemos tener una idea de los espesores mínimos. Las perforación más profunda dentro de la colonia tiene 137 m (B 508) quedando colgada en basalto. Por otra parte la perforación de OSE en Paso Farias (6.1.001), ubicada unos 10 km al N de la colonia, atravesó 180 m de lava, con 4 a 5 derrames. En el otro extremo, unos 9 km al sur de la colonia, la perforación de Diego Lamas (514/10), presenta un espesor de basalto de 164 m y unos 6 a 7 derrames superpuestos.

La región de la colonia Artigas presenta una cobertura de suelo casi continua y como se mencionó en el capítulo Geografía Física representada por planos y lomadas con muy poca pendientes. Esto se traduce que los afloramientos de lava sean escasos, en especial en la zona norte y que no existan importantes perfiles verticales que expongan toda la estructura interna de los derrames. Para salvar en parte esta dificultad y realizar la geología superficial, se efectuó una detallada fotointerpretación de las fotos 1:20.000, donde se utilizaron criterios geomorfológicos y de textura-color para identificar los límites de los derrames y realizar correlaciones entre zonas separadas. Una vez elaborada el mapa fotogeológico preliminar, se realizaron observaciones de campo para verificar límites de coladas y estructuras aflorantes. En base a las tareas anteriores y auxiliadas por descripción de testigos de perforaciones del área y mapa topográficos se definió la estratigrafía local y elaboró el mapa geológico final de la colonia Artigas (Figura 13-Anexo).

Para la zona de estudio se identificaron y delimitaron 4 derrames aflorantes, que como se mencionó anteriormente no presentan importante perfiles verticales expuestos y presentan una cobertura edáfica casi continua. Por lo que no fue posible realizar una observación clara de las estructuras internas de cada unidad volcánica, sino de pequeños afloramientos aislados.

Teniendo en cuenta estas limitaciones se presenta una descripción de los derrames identificados, desde la base a la cima:

<u>El derrame basal</u>, denominado 1a en el mapa geológico, se desarrolla en el noreste del área, en especial en el valle del arroyo Cuaró Grande, cubierto mayormente por los aluviones cuaternarios del curso de agua y suelo. Hacia el margen izquierdo, presenta una importante pendiente que se interpreta como el límite con la colada superior. Acá el contacto inferido, está cubierto por coluviones con suelo continuo. Este derrame está aflorante también en los

pequeños valles “encajonados” de los principales cursos de agua en la zona centro-norte. Su límite con la colada superior fue identificado en base a criterios morfológicos y a observaciones de campo. En la cuenca media-inferior de la Zanja de los Carpinchos, puntos de geología 37, 40 y 41, solo se observó el basalto masivo en el cauce y un cambio abrupto de pendiente hacia las zonas altas, interpretado como el límite con la colada superior (colada 2). En esta zona se desarrolla un suelo relativamente profundo con un horizonte C potente. Se interpreta, que en esta zona, el nivel vesicular superior de la colada basal, está profundamente alterado y es el material madre del horizonte C. Una situación diferente se observó en el valle de la cañada del Chircal, punto de observación geológica 65, con buenos aforamientos de roca. Acá la parte superior del derrame basal aflora en el cauce y márgenes del curso de agua y está conformado por basalto vesicular con cantidades variables de granos y fragmentos de arenisca, que le confiere a la roca una alta resistencia. Por encima aparece la base del derrame superior, representado por basalto masivo, de grano fino-medio, con estructura en bloques (Figura 14). También se ha observado el contacto entre el derrame basal (nivel vesicular) y la base del derrame superior (nivel masivo) en los puntos de observación geológico número 60 y 67.

Figura 14 : Imágenes de los afloramientos del punto geológico 65. Foto A, contacto basalto vesicular (Bv) de la colada basal o colada 1a y basalto masivo (Bm) en bloques de la base de la colada superior o colada 2. Foto B, detalle del basalto vesicular de la colada 1a, con cantidad variable de fragmentos de arenisca.

El tope del derrame basal se ubica a cota 90±10 m s.n.m., que podría ser utilizado como una guía para el mapeo del límite superior y correlación de zonas separadas espacialmente, siempre que la unidad volcánica este horizontal o con un buzamiento muy bajo.

En el extremo SE del área se identificó y separo a partir de la fotointerpretación el derrame denominado 1b. Al igual que en el derrame basal, se observaron a nivel de campo dos situaciones distintas del límite separado en base a fotointerpretación. En la zona más al sur presenta una importante cobertura edáfica, sin afloramientos y el límite fue definido solo por criterios morfológicos, representado por un pequeño cambio de pendiente. Solo en una

pequeña cárcava, punto geológico 25, encima de un basalto masivo aflorando en la cañada del Sarandí, se observó el tope de la colada 1b. En este punto aparece un material marrón, arcillosos, que conserva aún la textura vesicular. Este afloramiento confirma que al menos en parte de esta zona, el cambio morfológico representa el límite de coladas. Y que la gran cobertura y desarrollo de suelo está relacionada a la importante alteración meteórica del nivel vesicular del derrame 1b. Más al norte, también sobre la cañada del Sarandí, se observa en la ladera alta (punto geológico 28) el límite bien expuesto de la colada 1b y el derrame superior (derrame 2). En este lugar se observa grandes bloque con la textura superficial "rugosa" típica del basalto vesicular-brechoide, conformado por fragmentos irregulares de basalto vesicular rojizo, en una masa fina de basalto y arena. Inmediatamente por encima se observa basalto masivo en bloques y con esbozo de estructura lajosa de la base del derrame 2 (Figura 15).

Figura 15 : Imágenes de los afloramientos del punto geológico 28. Foto A, contacto basalto vesicular-brechoide (Bv-b) de la colada 1b y bloques de basalto masivo con esbozo de estructura lajoso de la colada 2. Foto B, detalle de bloques de basalto masivo (Bm) y basalto lajoso (Bm-l) de la colad 2.

No se pudo establecer la relación estratigráfica correcta entre los derrames 1a y 1b. En principio, en base a la fotointerpretación y a observaciones de campo de algunas características de ambos derrames, podría tratarse de la misma unidad volcánica. El principal inconveniente de esta hipótesis es que el tope del derrame 1b está en cotas 120±10 m s.n.m., unos 20-30 m más alto que el tope del derrame basal. Existen antecedentes cartográficos que indican que en algunas regiones de la zona basáltica se produjeron eventos tectónicos pos-emplazamiento, que colocan a un mismo derrame a cotas diferentes [ej. J. Bossi & E. Heide – 1970]. Es decir no se puede descartar un evento tectónico pos-emplazamiento que genere desplazamiento vertical, en especial basculamiento de todos o algunos de los derrames de la región de la colonia. Pero dada la falta de datos estructurales-tectónicos, se optó por mantener en el mapa geológico los derrames 1a y 1b como unidades volcánicas distintas.

El derrame número 2, ocupa la mayor parte de la colonia y es erosionada por los principales cursos de agua en especial en la en la zona NE, lo que permite el afloramiento del tope de las coladas 1a y 1b. Y es recubierta por la colada 3 en la región S-SW.

La parte basal, conformado por una basalto masivo, con estructura en bloques y subordinamente lajoso, ya fue descripto anteriormente en el contacto con los derrames 1a y 1b (puntos geológicos 60 y 28). La parte superior (en especial el tope) esta mayormente erosionada, salvo en los contactos con el derrame 3 ubicado en general en las laderas altas. En la zona SW se han localizado los mejores afloramientos del tope de la colada 2 y base de la colada 3. En el punto de observación geológica 7A, se observa un basalto vesicular gris con cantidad variable de fragmentos de arenisca. En los puntos 7B y 7C, sobre el basalto vesicular marrón alterado se apoya en parte un cuerpo de arenisca de espesor decimétrico e inmediatamente por encima la base masiva de la colada 3. En el punto 9 el basalto vesicular alterado está en contacto con el basalto masivo gris de la colada superior 3, con intercalación de bloques de arenisca. Otro lugar donde fue observado el tope de la colada 2, es la zona centro este. Acá en el punto geológico 58, afloran varios cuerpos, con textura superficial rugosa, conformado por basalto vesicular brechoide que marcan del tope del derrame (Figura 16)

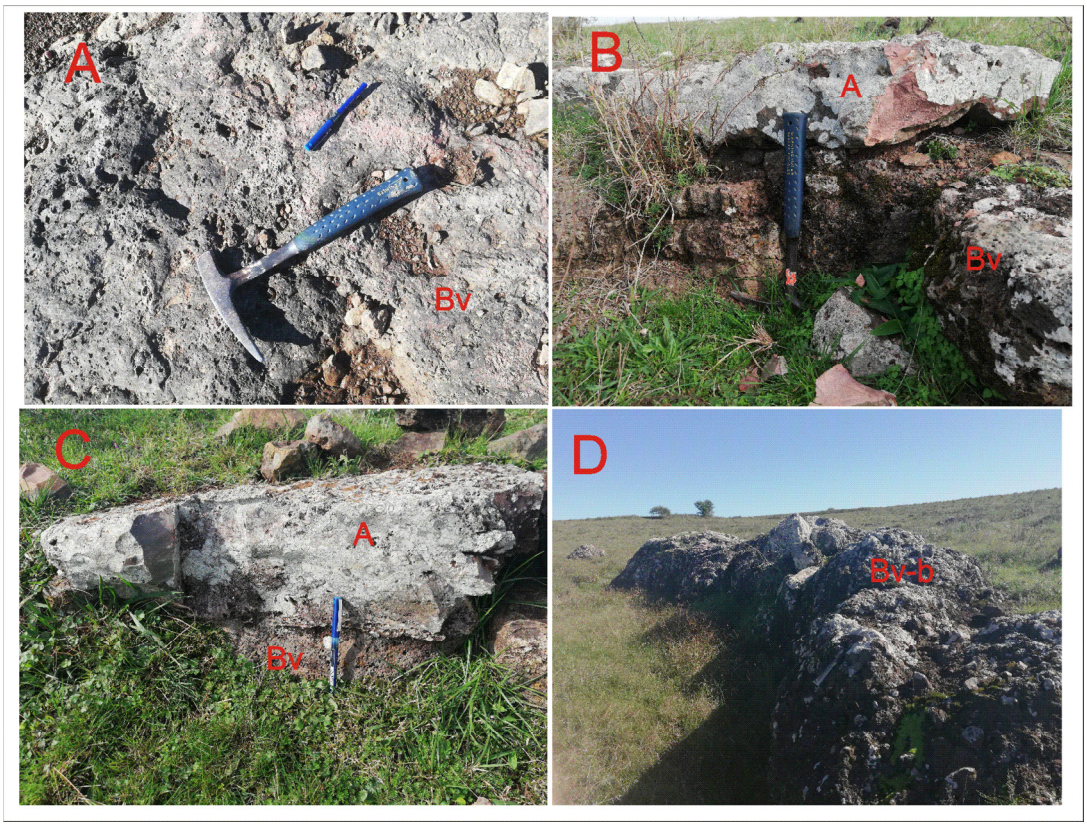


Figura 16 : Imágenes de los afloramientos del tope del derrame 2. Foto A, punto 7A, basalto vesicular (Bv) con fragmentos de arenisca. Foto B, punto 7C basalto vesicular (Bv) con nivel de arenisca rojiza (A). Foto C, punto 9, basalto vesicular (Bv) con nivel de arenisca (A) . Foto D, punto 58, basalto vesicular-brechoide (Bv-b).

El derrame 3, el más alto en la estratigrafía local, aflora en forma continua en la zona S-SW y en forma de cuerpos alargados y aislados en la zona este. Este derrame esta mayormente erosionado por lo que solo quedan los restos de la base del mismo. La base de este derrame y el tope de la colada inferior (2) se ubica aproximadamente entre cotas 120 y 140 m s.n.m y conforma los planos sub-horizontales o lomadas muy suaves de las zonas más altas.

En base a estudio de algunas perforaciones dentro de la colonia, se identificó e interpreto un quinto derrame no aflorante en el área, por debajo de los derrames 1a y 1b, denominado colada CA (para más detalle ver Tablas 1a, 1b y 2 en Anexo).

7.4. Hidrogeología de la colonia Artigas

Como se explicó anteriormente el principal motivo de elección como área para estudio de detalle o área "Piloto" de la colonia José Artigas fue la cantidad de perforaciones para agua, con información de cierta calidad. La fuente de información proviene de perforaciones ejecutadas por Dinamige y la empresa Hidrosa así como de datos de Prenader, Dinagua y privados. El principal problema de esta información, era que los pozos tenían una ubicación solo aproximada, ya que solo se contaba con el dato de la fracción de la colonia donde se había ejecutado. Por lo que se realizó una campaña de campo para identificar y ubicar en forma precisa el o los pozos de las diferentes fracciones. El resultado es que se tiene 2 tipos de grupos de pozos. Por un lado aquellos pozos que pudieron ser ubicados e identificados dentro de cada fracción y se midió su ubicación en forma precisa. Dentro este grupo, hay algunos pozos nuevos, que no se tenía registro previo. Y por otro lado un grupo de pozos que se localizaron, pero no pudieron ser identificados o que no se pudo visitar la fracción por temas de tiempo o directamente no se localizaron (principalmente los pozos secos). En base a lo anterior para la caracterización general de los aspectos hidrogeológicos del área se utilizaron todas las perforaciones, pero para el análisis hidrogeológico-estructural se usaron principalmente el grupo de pozos con ubicación precisa (Figura 17 y Tablas 3a y 3b-Anexo).

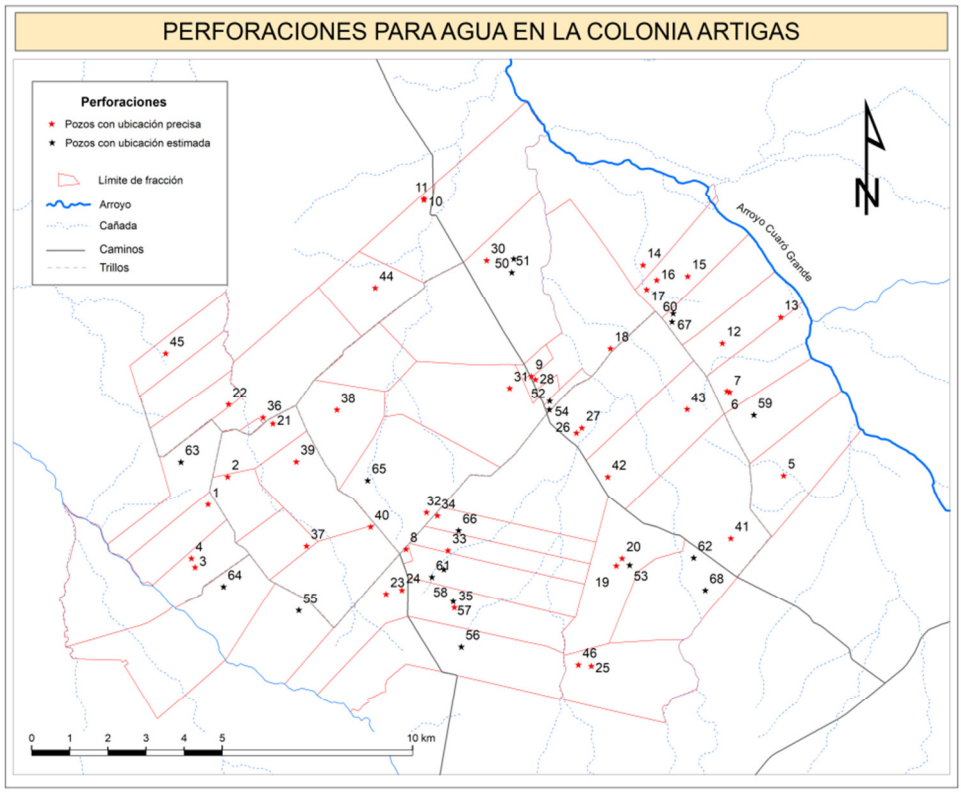


Figura 17 : Ubicación de perforaciones para agua en la colonia José artigas. (ver Tabla 3a y 3b-Anexo, para detalles de cada perforación)

7.4.1. Datos hidrogeológicos de la colonia Artigas

Fueron identificados a partir del relevamiento 64 perforaciones que extraen o extraían (varios pozos hoy están fuera de servicio) agua de unidad hidrogeológica Arapey en la colonia José Artigas, con información heterogénea en cuanto a tipo de datos disponible. Con la información de las perforaciones con datos (profundidad de pozo y de napa, caudal y descenso) se ejecutó un análisis estadístico básico. Los resultados se presentan en forma de gráfica, con un cuadro estadístico adjunto y breve cometarios:

La mayoría de las perforaciones de un total de 62 (cerca del 80 %) presentan profundidades iguales o menores a los 70 m, los intervalos más frecuentes son entre 30 y 40 m y entre 50 y 60 m. La media de profundidades es de 54 m y la mediana de 52 m (Figura 18-A).

La ubicación en profundidad de las estructuras (fracturas, fallas y estructuras horizontales) de donde se capta agua subterránea es muy variable, sin una profundidad o intervalo de profundidad predominante. De 47 pozos analizados el valor fluctúa entre un mínimo de 6 m y

una máximo de 95, siendo el promedio y mediana de 38 m y 35 m respectivamente (Figura 18-B).

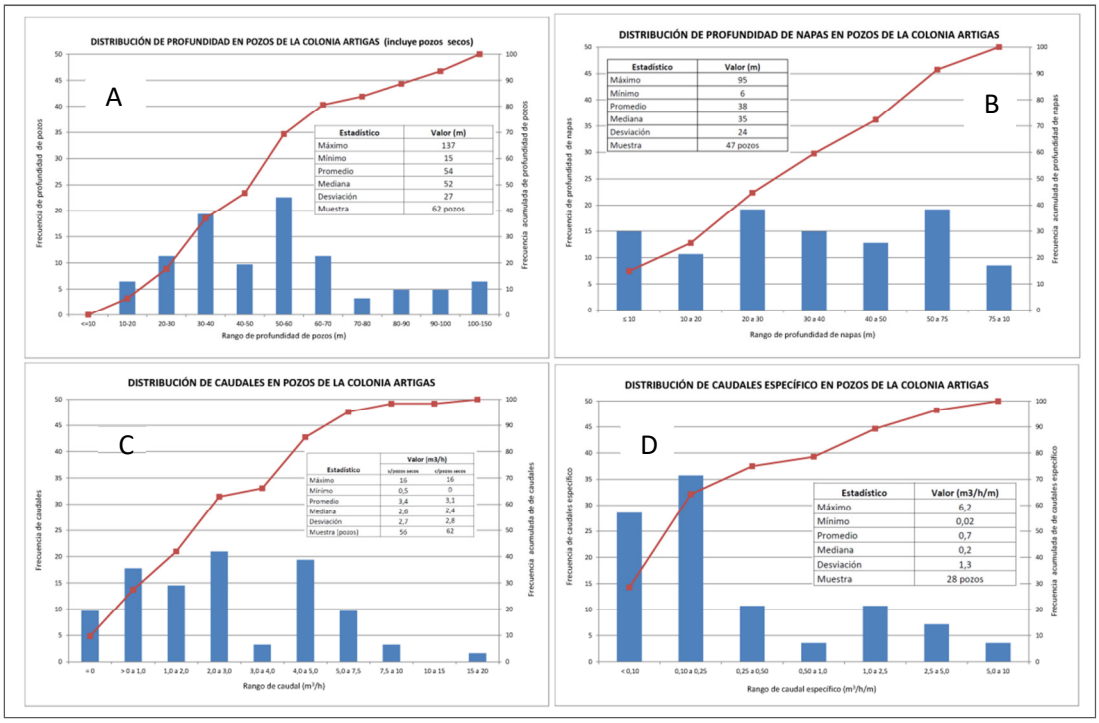


Figura 18 : Análisis de los datos de profundidad de pozos, de napa, caudal y caudal especifico de perforaciones que extraen agua de acuífero Arapey en la región de la colonia Artigas.

En cuanto a los datos de caudal de 56 perforaciones, se registraron un máximo de 16 m^3/h hasta un mínimo de 0,5 m^3/h, siendo el valor promedio de 3,4 m^3/h y la mediana de 2,6 m^3/h. Existe una importante dispersión en los caudales, con un grupo mayoritario con menos de 3,0 m^3/h y un grupo menor con valores de caudal entre 4 y 10 m^3/h. Pero la gran mayoría (más del 80 %) de los pozos presenta caudales menores 5 m^3/h. De total de perforaciones relevadas (62), cerca del 10 % son pozos secos (Figura 18-C).

Solo la mitad de las perforaciones relevadas tiene datos de descenso, para el cálculo del caudal especifico. De estos pozos cerca del 80 % presentan valores de caudal específico menor a 1 $m^3/h/m$ y casi el 100 % menor a 5,0 $m^3/h/m$. El valor más alto encontrado fue de 6,2 $m^3/h/m$ y el menor de 0,02 $m^3/h/m$, siendo el promedio 0,7 $m^3/h/m$ y la mediana 0,2 $m^3/h/m$. El intervalo más frecuente 0,1 a 0,25 $m^3/h/m$, seguido del intervalo < 0,10 $m^3/h/m$ (Figura 18-D).

7.4.2. Aspectos estructurales de la colonia Artigas

Para el análisis de estructuras verticales-subverticales solo se utilizó la información obtenida a partir de identificación de lineamientos en las imágenes satelitales de detalle. Los foto-lineamientos interpretados como fracturas y fallas fueron digitalizados y procesadas con distintas herramientas del software ArcGIS y otros programas. Los resultados, densidad, longitud y orientación de las fracturas se muestran en forma de mapas y diagramas para su mejor visualización e interpretación.

La región de la colonia Artigas está ubicada muy cerca de una gran estructura N50-60W que pasa por el W de Masoller hasta el E de Paso Farías. Esta gran estructura es interpretada como una falla o sistema de fallas, con alguna componente vertical y que limita dos regiones o bloques (F1-F2, Figura 2).

Específicamente, en el área de estudio y a partir de los lineamientos identificados se realizó un mapa de densidad de fracturas, para definir la distribución espacial en términos de unidad de longitud por unidad de área (km/km^2). El resultado se presenta en la Figura 15, donde se observa zonas con mayor densidad junto a zonas con muy baja densidad. En especial resalta una gran región central de la colonia, con una densidad de fracturación alta y que es atravesada por fracturas o fallas de gran porte (> 10 km) (Figura 19).

Además se realizó un procesamiento de los lineamientos con la herramienta COGO de ArcGIS, para calcular orientación y longitud de las estructuras lineales identificadas dentro de la zona de mapeo geológico. Los datos crudos fueron agrupados por rango de orientación y longitud y se presentan los resultados en diagramas de dirección. Cuando se representan todas las direcciones, sin diferenciar longitud, se observa que hay una importante dispersión, con cierta tendencia a ser más frecuentes las direcciones del cuadrante NE, en especial N0-20E, N30-40E y N60-70E (Figura 20A). Para las fracturas menores a 250 m, las direcciones más frecuentes son N10-20E, N30-40E y N60-70E (Figura 20B). Si se considera el rango de longitud entre 250 a 500 m, no se observa una dirección claramente dominante aunque con cierta tendencia a predominar las direcciones NE (Figura 20C). Para las fracturas de mediano porte, 500 a 1000 m, la dirección más frecuente es N50-60E, en forma subordinada N40-50W y N10-20E (Figura 16D). Por ultimo para las fractura de gran porte, más de 1000 m la dirección más frecuente es N0-10E y N10-40W (Figura 20E).

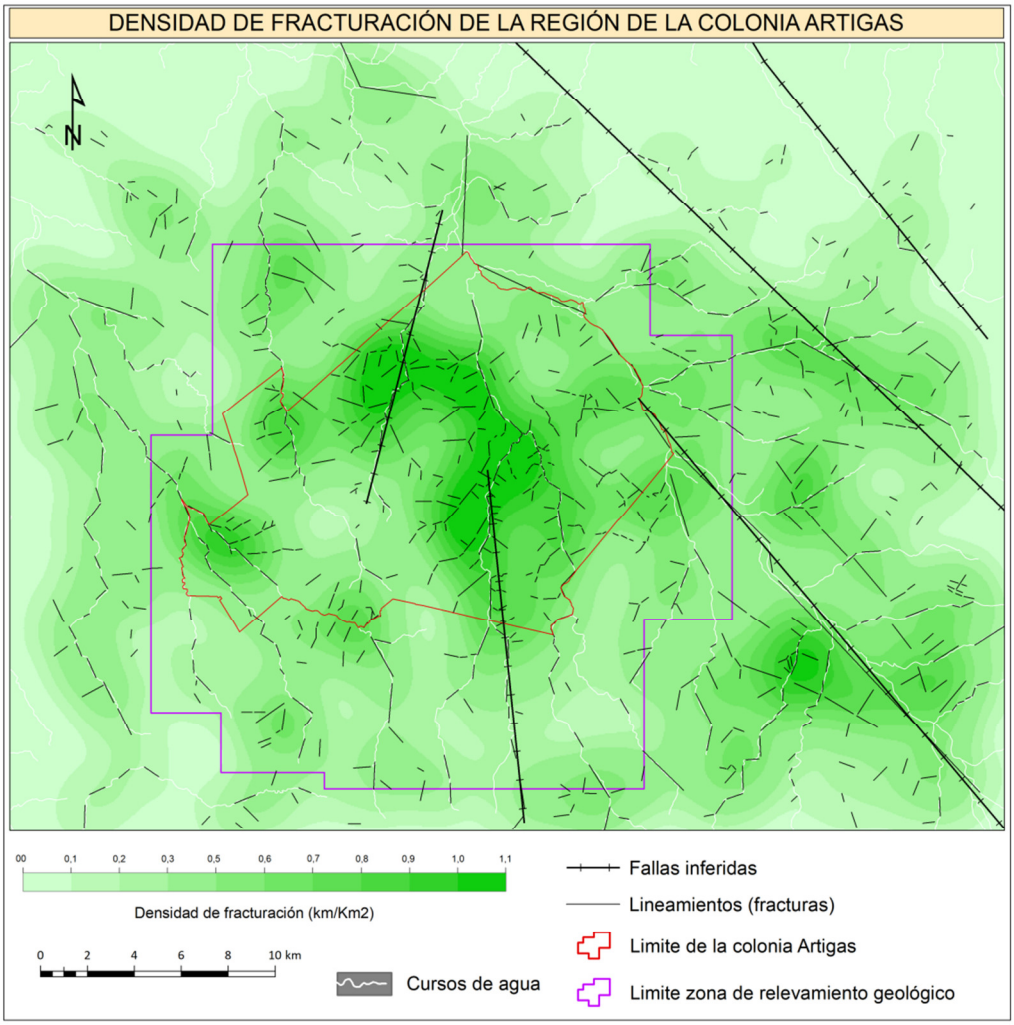


Figura 19 : Mapa de fracturas y de densidad de fracturación de la colonia Artigas y alrededores.

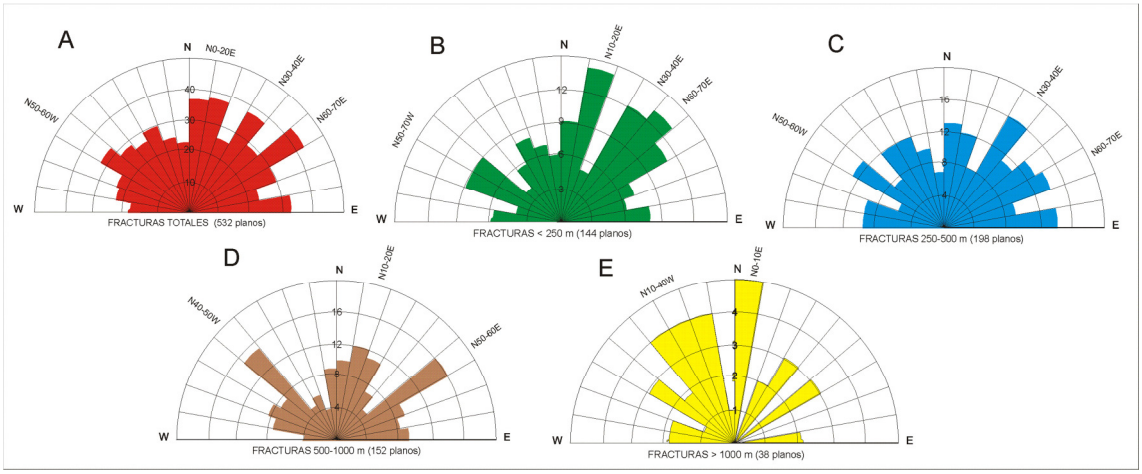


Figura 20 : Direcciones de lineaminetos, agrupadas según longitud, en la colonia Artigas.

Las estructuras hrizontales, para el área de estudio que se han identificados corresponden con la zona de contacto de las coladas. En base a la geologia superficial y geomorfologia antes descripta la zona ineterderrame, se corersponde con la region de contacto entre el tope de coladas 1a o 1b/base colada 2 y tope colada 2/base colada 3. Esta zona ineterderrame, esta conformada en forma simplificada por :

- ✓ Basalto vesicular marrón, muy alterado en contacto con un basalto masivo, de grano fino relativamente tenaz con estrutura en bloques (contacto colada 1a o 1b/colada 2).
- ✓ Basalto vesicular a brechoide, con arensica en proprciones variable moderadamente alterado en contacto con un basalto masivo, de grano fino relativamente tenaz con estrutura en bloques y subordinadamente lajoza (contacto colada 1a o 1b/colada 2).
- ✓ Basalto vesicular marrón-rojizo, alterado en contacto con un basalto masivo, de grano fino relativamente tenaz con estrutura en bloques y con frecuente fragmentos y niveles de arenisca entre el contacto (contacto colada 2/±arensica/colada 3).

En base a descripción e ineterpretación de algunas perforaciones mas potentes se detecto una posible zona inetrderrames profunda representada por el contacto entre los derrames 1a o 1b y un derrame inferior no aflorante denominado CA (Tabla 2 - Anexo).

7.4.3. Características y calidad del agua en el acuífero Arapey - colonia Artigas

Los datos químicos-físicos del agua subterránea en la zona de la colonia Artigas son pocos y parciales, realizados por la Dinamige en los comienzos de la colonia. Los parámetros y elementos determinados fueron pH, conductividad (este trabajo), dureza total, alcalinidad total y los aniones bicarbonato, sulfato, nitrato y cloruro. Los resultados por número de pozos se muestran en el cuadro siguiente.

DATOS FISICO-QUÍMICOS DEL AGUA DEL ACUÍFERO ARAPEY EN LA REGIÓN DE LA COLONIA ARTIGAS								
Número	pH	Dureza Total en $CaCO_3$ (ppm)	Alcalinidad Total en $CaCO_3$ (ppm)	Bicarbonato en $HCO3^-$ (ppm)	Nitratos en NO_3^- (ppm)	Sulfatos en SO_4^- (ppm)	Cloruros en Cl^- (ppm)	CE in situ (µS/cm)
8	7	45	202	203	42	36,2	35,8	
9	7	160	181	221	17	3,53	9,09	
26	7,4	215	311	379	36,5	9,46	54,5	
44	7	40	164	117	0	12,8	20,3	460
52	7	160	203	129	3,75	5,59	8,7	
25	7,4	330	223	139	Trazas	181	18,4	
14	7,4	300	349	426	4,4	4,11	6,79	
42	7,1	220	226	267	16,5	57,5	11,6	
3	7	160	190	207	0	Trazas	10,6	
43								670
MEDIANA	**7**	**160**	**203**	**207**	**10**	**11**	**12**	**565**
Cantidad de muestras	9	9	9	9	9	9	9	2
VMP	--	500	--	--	50	400	250	1300
Muestras > VMP	--	0	--	--	0	0	0	0

Cuadro 4 : Características del agua extraídas de perforaciones del acuífero Arapey en la colonia Artigas.

Para los parámetros analizados, el agua de la zona de la colonia Artigas es de calidad aceptable, con todas las muestras con valores por debajo del valor máximos permitidos

(VMP). De todas formas faltaría tener resultados de otros elementos como metales pesados, arenisco, flúor, etc., para poder evaluar en forma precisa la calidad del agua de la colonia.

En cuanto a las características hidrogeoquímicas del agua del acuífero Arapey en las perforaciones de la colonia Artigas, se observa que en líneas generales es similar al resto del área basáltica (ver capítulo 3.4.). Se trata de aguas moderadamente mineralizadas (moderado-altos valores de conductividad), aguas duras y con alta alcalinidad debida principalmente a la concentración del anión bicarbonato.

7.5. Análisis integrado hidrogeológico-estructural de la colonia Artigas

7.5.1. Información, procesamiento y productos

Para el reconocimiento del subsuelo, en especial la localización de las interface en el contacto entre derrames (zonas interderrames) se utilizaron por un lado las perforaciones de Dinamige y Prenader con perfiles litológicos y por otro lado el resultado del procesamiento espacial de carta geológica de la colonia Artigas.

Las perforaciones de Dinamige, no permiten una identificación clara de la estructura interna de los derrames atravesados ya que muchas presentan testigos que abarcan tramos muy grandes y además de tratarse material fragmentado (ripios). La descripción del perforador se utilizó solo en forma orientativa ya que abarca tramos más pequeños. Para las perforaciones de Prenader se utilizó la descripción del técnico responsable de la obra (Tabla 1a y 1b-Anexo).

Por una parte se realizó un procesamiento espacial de puntos acotados de los contactos de la colada 2 y 1 (1a y 1b) extraídos de la carta geológica de la colonia y utilizando el modelo digital de terreno elaborado por la Dirección de Recursos Naturales Renovables (Renare). Para el procesamiento espacial se utilizaron los módulos geo-estadístico y análisis espacial del programa ArcGIS. El producto final es un raster que muestra la variación en el espacio del espesor del derrame 2, a partir de la cual se puede estimar aproximadamente la profundidad de la zona interderrame no aflorante (Figura 21).

Por otra lado en base a la descripción de las perforaciones, con las limitaciones antes mencionadas, se realizó una interpretación de la posible estratigrafía de la zona en profundidad. Con aquellas perforaciones más potentes se identificó un posible derrame no aflorante en la zona de estudio, por debajo de los derrames 1a y 1B, denominado colada A (CA). La zona de interface entre estas dos coladas constituye una zona de interderrame “profunda” o zona interderrame 2, que estaría ubicada con muy poca precisión, entre los 40 y 50 m de profundidad (Figura 21).

Como se mencionó con el raster de espesor del derrame 2 y auxiliado por la descripción de las perforaciones con perfil litológico se identificó la interface entre los derrames 2 y derrames 1a o 1B no aflorante, que constituye la zona de interderrame "somera' o zona interderrame 1.
Un cuadro síntesis de la interpretación de algunas perforaciones y de la localización en profundidad de las zonas interderrame 1 y 2 se presenta en la Tabla 2 - Anexo.

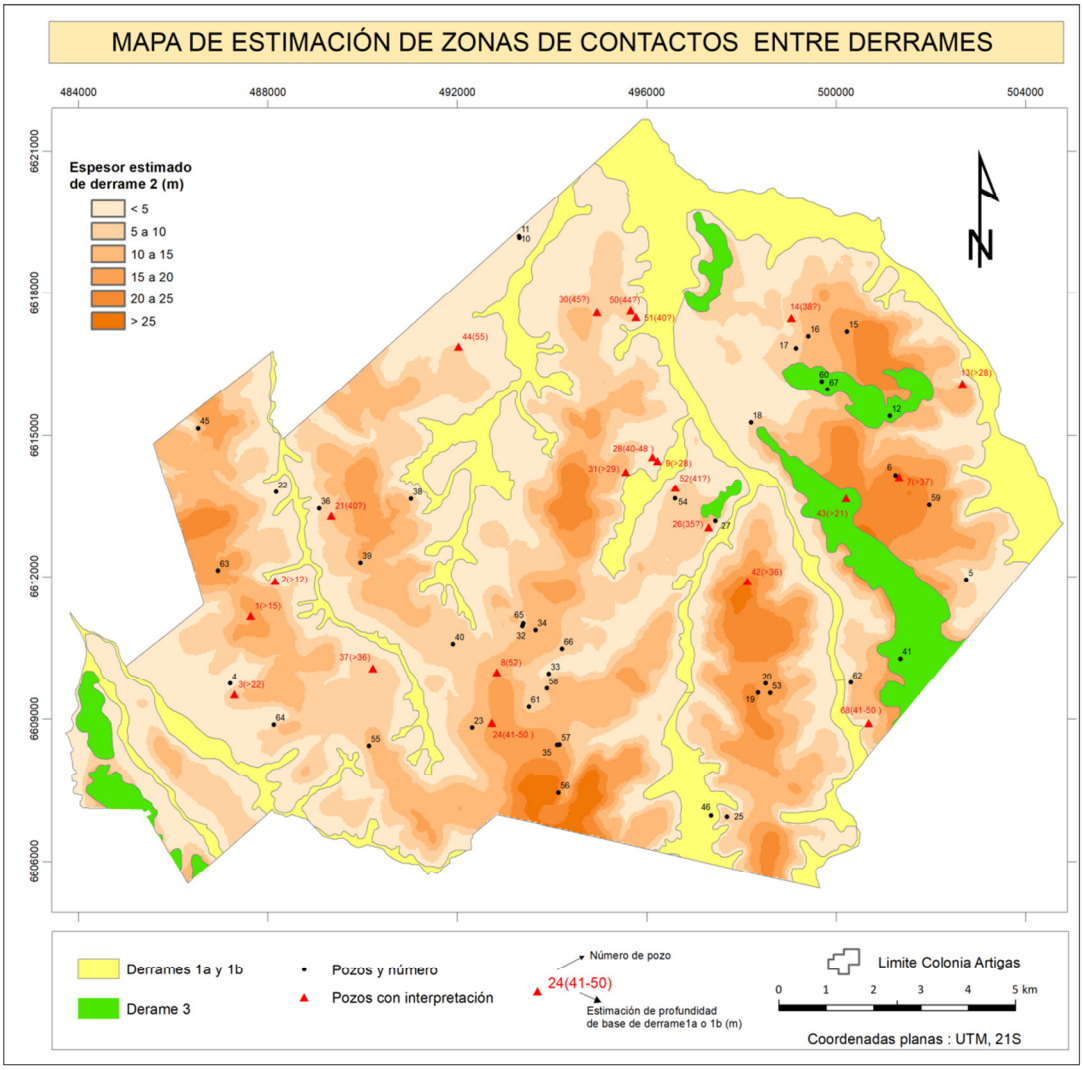


Figura 21 : Estimación de espesor del derrame 2 y ubicación de zonas interderrames.

Para el tratamiento y análisis de la estructuras verticales-subverticales del área piloto se procedió al procesamiento de los lineamientos fotointerpretados dentro de la colonia junto con las perforaciones existentes. El análisis consistió en la observación de la ubicación de las estructuras identificas con respecto a la perforaciones. En este sentido se separaron tres situaciones: pozos en o muy cercanos a estructuras (categoría 1), pozos con estructuras cercanas (categoría 2) y pozos "aislados" sin ninguna relación con estructuras (categoría 3).

Además se evaluó la posible relación de la densidad y direcciones de las estructuras (categorías 1 y 2) con la ubicación y caudal de las perforaciones (Figura 22).

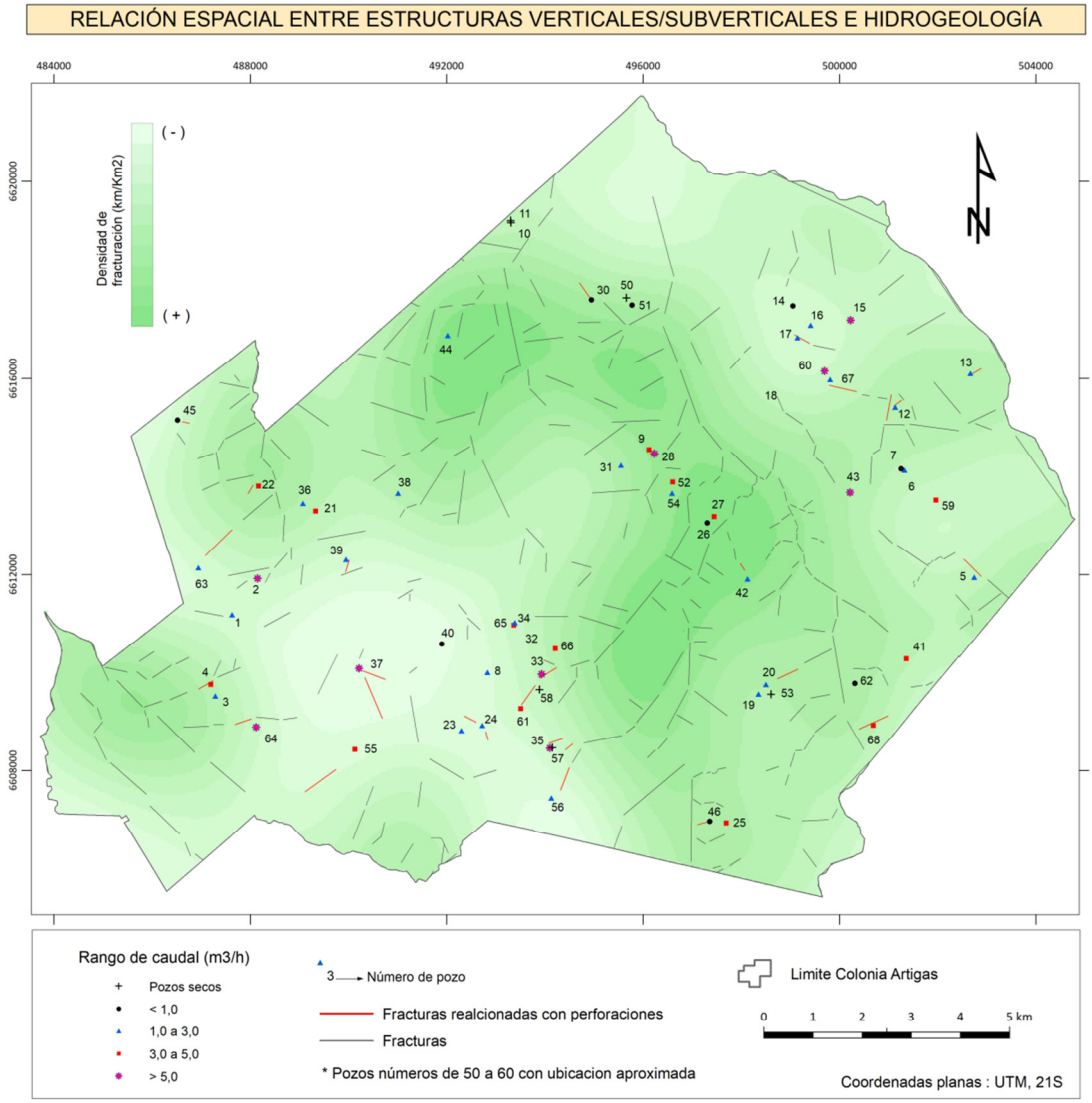


Figura 22 : Relación espacial entre estructuras verticales-subverticales y perforaciones en la colonia Artigas.

7.5.2. Análisis y discusión

En base al procesamiento de la información estructural, hidrogeológica y geológica, antes mencionadas se elaboraron varios productos que serán utilizados para el análisis y discusión de la hidrogeología de la colonia Artigas.

En cuanto a las estructuras verticales-subverticales, su importancia no tiene discusión en este tipo de acuífero, porque además de ser las zonas principales de circulación/almacenamiento,

representan la entrada de agua al sistema. Para el caso de la región de la colonia sé observa que varias perforaciones están ubicadas en o cerca de estructuras verticales-subverticales, por lo que se puede asumir que el agua alumbrada proviene de fracturas (Figuras 22 y Cuadro 5). Para este tipo de estructuras "productivas" (categorías 1 y 2) se realizó un análisis de las direcciones en base a un diagrama de direcciones, que se muestra en Figura 23. Si bien son relativamente pocos plano para sacar una conclusión definitiva, se observa que para estas estructuras en o muy cerca de las perforaciones predominan ampliamente las dirección N50-60E y secundariamente N60-80E y N60-70W. No parece existir una correlación directa entre densidad de fracturas y productividad de pozos medido en términos de caudal. Es más la mayoría de los pozos con caudales mayores a 5 m^3/h se ubican en zonas de moderada a baja densidad de fracturación. Parece que son más importante las características individuales de las discontinuidades, como permeabilidad, porte, penetración y cruzamiento de estructuras.

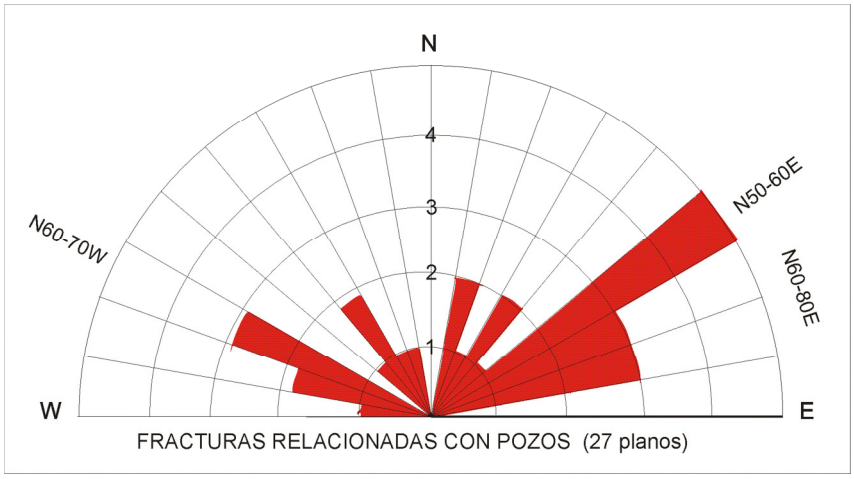


Figura 23 : Diagrama de direcciones de estructuras verticales-subverticales productivas.

En lo que tiene que ver con las estructuras horizontales, el análisis se centró en definir las características básicas y ubicación y si las mismas son o no potencialmente importantes para el almacenamiento de agua subterránea. Estas estructuras horizontales están representadas principalmente por la interface entre dos derrames superpuestos, donde generalmente se enfrentan litologías con texturas-estructuras diferentes. Para el área piloto se identificaron 2 interfaces, denominadas zonas interderrames. La ubicación en las zonas cubiertas, de la zona inetrderrame 1 (interface somera), se estimó en forma indirecta a partir del espesor del derrame 2. Se localiza a una profundidad que varía entre pocos metros a algo más de 30 m. Para la ubicación aproximada de la zona inetrderrame 2 (interface profunda) se utilizó la

descripción/interpretación de las perforaciones más potentes, estimándose su ubicación en forma muy aproximad entre los 40 y 50 m. (Figura 21)

También se realizó un análisis y correlación en conjunto de la profundidad estimada de las zonas ineterderrames, ubicación de pozos, profundidad de la zona de captación de agua y relación espacial entre los pozo y las estructura verticales-subverticales. Los resultados se sintetizan en el cuadro 5.

Es interesante observar que en muchas perforaciones coincide aproximadamente la ubicación de la (las) napa(s) con la profundidad estimada de la zona inetrderrame 1 y/o zona interderrame 2. Además, dentro de este grupo, varias de las perforaciones están alejadas de cualquier estructura vertical- subvertical (categoría 3).

Pozo No.	Profund. (m)	Caudal (m3/h)	Napa 1 (m)	Napa 2 (m)	Espesor C2 (m)	Tipo de relación	Estructura portadora
1	14,7	2,4	8		15	2	EVS
2	18	8,8	6,5		4	2	ZI_1
3	22,5	2,6	7	20,5	11	3	ZI_1
4	31	5			6	1	EVS
5	48	1,8	47		5	1	EVS y/o ZI_2
6	124,6	0,8			21	3	n_d
7	38	2			21	3	n_d
8	55	2,6	18	52	13	3	ZI_1 y Z_2
9	28	4,4	25		4	3	n_d
10	60	seco			7	3	n_d
11	60	seco			8	3	n_d
12	61	2,2	60		12	1	EVS
13	28	2			7	1	EVS
14	61	0,9	10	35	8	3	ZI_1
15	39	6	38		18	3	ZI_2
16	55	2			14	3	n_d
17	35	3			10	1	EVS
19	40	1,5	39		22	3	ZI_2
20	57	1,2			21	2	EVS
21	40	3,7	21	38	11	3	ZI_2
22	35	4,5	22	30	5	2	EVS
23	70,4	3	69		14	3	n_d
24	52	2,2	16		15	2	EVS y/o ZI_1
25	28	4,5	17	24	7	3	n_d
26	95	0,7	33		12	3	n_d
27	45	5			9	3	n_d
28	60	6			2	3	n_d
30	70	0,6	5,5		8	1	EVS y/o ZI_2
31	29,3	2,3	10		8	3	ZI_1
32	52	4,8	50		9	3	ZI_2
33	16	16			7	1	EVS
34	sd	sd			12	3	n_d

Pozo No.	Profund. (m)	Caudal (m3/h)	Napa 1 (m)	Napa 2 (m)	Espesor C2 (m)	Tipo de relación	Estructura portadora
35	53	7	50		16	1	EVS y/o ZI_2
36	120	1,8	90		4	3	n_d
37	36	6,6	9	33	9	1	EVS y/o ZI_1
38	96,5	2,2	95		8	3	n_d
39	96	1,4	95		14	2	EVS
40	36	1			9	3	n_d
41	60,5	4,5	59		22	3	n_d
42	36	1,1	27		24	2	ZI_1
43	19	6,6	17		22	3	ZI_1
44	81,5	1,2	79		11	2	n_d
45	31	1			13	2	EVS
46	86	0,5	21		0	1	EVS
50	44	seco			8	3	n_d
51	70	0,8	22		1	3	n_d
52	41,5	4,8	14	39,5	9	3	ZI_1 y Z_2
53	90	seco			21	3	n_d
54	60,5	2,6	57		10	3	n_d
55	51,3	4,5	48		8	3	ZI_2
56	52	2,8	50		15	2	ZI_2
57	137	seco			16	2	EVS
58	23,5	seco			12	2	EVS
59	45,6	4,5	44		20	3	ZI_2
60	57	6	53		13	3	ZI_2
61	55	3,2	54		9	1	EVS y/o ZI_2
62	107	0,6			10	3	n_d
63	67	2,4	63		16	2	EVS
64	72,5	8	70		4	2	EVS
65	45	2			1	3	n_d
66	40	5			8	3	n_d
67	55	3			12	1	EVS
68	27	5			5	1	EVS

Observaciones a) Napas 1 y 2 : profundidad en metros de las zona(s) de aporte(s) en cada pozo; b) Espesor máximo estimado del derrame 2 (C2); c) Tipo de relación: relación espacial entre estructuras verticales-subverticales y pozos; 1 muy cercana /2 cercana/ 3 sin estructuras cercanas; d) Estructura portadora: EVS estructura vertical-subvertical / ZI_1 zona interderrame 1 / ZI_2 zona interderrame 2/ n_d no determinado . Números en rojo pozos con ubicación estimada.

	Profundidad de napa coincide aproximadamente con zona interderrame 1
	Profundidad de napa coincide aproximadamente con zona interderrame 2

Cuadro 5 : Síntesis de relación espacial entre estructuras, perforaciones y napas.

8. MODELO DE FLUJO Y PROSPECCIÓN EN ACUÍFERO VOLCÁNICO ARAPEY

El principal objetivo de este trabajo, además de realizar una caracterización hidrogeológica del acuífero Arepey es proponer un modelo hidrogeológico descriptivo, que permita valorar cualitativamente las estructuras favorables para el almacenamiento y circulación de agua subterránea. Para ello, en una primera parte se presenta una síntesis de modelos de circulación propuesta en diferentes trabajos que abordaron el tema de agua subterránea en el acuífero volcánico Arapey/Serra Geral. En segundo término se presenta un modelo de flujo en base a la investigación desarrollada en el área piloto de la colonia Artigas.

8.1. Modelos de flujo : antecedentes (acuífero Arapey y Serra Geral)

En esta parte se presenta una síntesis de algunos modelos de flujo propuestos por varios investigadores para el acuífero volcánico (Serra Geral y Arapey) extraídos de la literatura.

Tomado de Hausman & Fernández - 1967 : El modelo hidrogeológico estructural de circulación de aguas subterránea en los basaltos para la región NW de la Formación Arapey sería: las fracturas tectónicas son los principales vías de circulación de agua, pudiendo cortar varios derrames. Esta circulación principal alimentan y conectan a las diaclasas, de escasa longitud y generalmente restringidas a la zona masiva de la lava, y que actúan como vías de circulación menor. Estos autores minimizan la importancia de las estructuras horizontales para la circulación de agua.

Tomado de de Freitas M. A. et al. - 2002 : La presencia del agua subterránea en las rocas volcánicas de la Cuenca del Paraná está vinculada a factores de origen genético y tectónica. El primer factor es condicionante intrínseco de la permeabilidad horizontal y el segundo condiciona la permeabilidad vertical, que intercomunican las estructuras acuíferas (discontinuidades) interderrames.

El modo de cómo ocurren las rocas volcánicas, la distribución espacial de sus estructuras intra e interderrames y los múltiples etapas de su formación, imprimen a este acuífero una notable y peculiar heterogeneidad física. Las características de este sistema dependerán de la dimensión y de la agrupación de las fracturas y otras discontinuidades. La conductividad hidráulica es, por lo tanto, muy variable y compleja, de difícil evaluación y previsión.

Los principales contribuyentes para el almacenamiento y circulación de agua subterránea en las rocas volcánicas se relacionan con factores de orden litológico, geomorfológico y estructural.

Tomado de Lastoria G. et al. - 2006 : La proposición de un modelo hidrogeológico conceptual para el Sistema acuífero Serra Geral en el área, se basó en el análisis de los flujos de agua en estructuras verticales y horizontales, presentes en los derrames basálticos. Sobre la base de las evidencias observadas, fue posible asociar a las juntas y los sistemas horizontales situado en la parte superior y en la base de los derrames, así como en el contacto entre derrames, la principal condicionante del flujo y almacenamiento de las aguas subterráneas, especialmente a través de juntas horizontales de gran continuidad.

Tomado de Roehe Reginato P. et al. - 2007 : Los acuíferos fracturados de la Formación Serra Geral poseen diversos condicionantes geológicos, siendo el sistema estructural el de mayor importancia, ya que la porosidad de las rocas volcánicas está asociada a la presencia de fracturas y zonas de fracturas. Sin embargo, se observó que en la región hay pozos que no están asociados a lineamientos, pero que son productivos, por lo tanto evidenciando un condicionamiento con la litología y sus respectivas estructuras primarias.
Las estructuras primarias que pueden ser consideradas como condicionantes de acuíferos en la formación Serra Geral, según el grado de importancia son: contacto entre rocas volcánicas y zonas vesiculares a amigdalóides y / o brechas, rocas volcánicas fuertemente vesiculares a amigdalóides y estructuras horizontales de los riodacitos.

Tomado de Fernandes A. J. et al. - 2016 : En las unidades de los basalto del área de Ribeirao Preto, las estructuras con mayor transmisvidad serían las fracturas horizontales de la base del derrame 3 y el contacto entre la zona columnar y de entablatura de este mismo derrame.
Los niveles vesiculares, que se producen en la parte superior e inferior de los flujos de basalto, funcionan como barreras hidráulicas regionales para el flujo vertical, ya que carecen de fracturas interconectadas y las vesículas están aisladas unas de otras y generalmente rellena de minerales hidrotermales. Las juntas de enfriamiento vertical y horizontal en la parte central de cada derrame están rellenas por minerales secundarios y no son importantes para el flujo de agua subterránea. El modelo regional de flujo de agua subterránea es de tipo “stratabound” Sin embargo, localmente fracturas tectónicas subvertical de mayor porte, potencialmente podría propagarse a través de las capas vesiculares y sedimentos intertrap, conectando las fracturas transmisivas horizontales. A diferencia de las juntas de enfriamineto, estas fracturas tectónicas pueden ser importantes para el flujo de agua en los basaltos.

8.2. Modelos de flujo : acuífero Arapey-colonia Artigas

En base al estudio de detalle del área piloto, en especial al análisis integrado hidrogeológico-estructural de la colonia Artigas y a los antecedentes de otros estudios sobre el tema se plantea un modelo hidrogeológico. Básicamente se intenta identificar y ponderar las estructuras relevantes para la entrada, circulación y almacenamiento de agua subterránea en este tipo particular de acuífero. Podemos ver el reservorio de agua Formación Arapey como un acuífero fisurado o fracturado con estructuras horizontales primarias que potencialmente pueden ser importantes para el almacenamiento y circulación de agua subterránea.

Las principales vías de entrada de agua al sistema acuífero son las estructuras verticales-subverticales. Estas mismas estructuras u otras conectadas hidráulicamente con las mismas, son las más importantes zonas de almacenamiento y circulación de agua subterránea. En general las discontinuidades tectónica, producidas por esfuerzos post-enfriamiento de la lava (sin y post evento efusivo), son las estructuras más productivas. En especial aquellas con mayor desarrollo horizontal y vertical y que intersecan más de una colada. Estructuras menores, como diaclasa de enfriamiento y discontinuidades relacionadas a estructuras dentro del nivel masivo de la lava, como estructuras columnares, entablaturas y lajosa serían poco importantes o de importancia local.

Para la zona de la colonia Artigas se identificaron varias estructuras (categoría 1 y 2) relacionadas espacialmente a las perforaciones. Varios de estos pozos, que seguramente captan agua de fracturas, tienen los caudales relativamente más altos (mayor a 5 m^3/h) y en especial uno de ellos presenta el caudal más alto de toda la colonia (16 m^3/h). Pero también se observan perforaciones en o muy cerca de estructuras verticales-subverticales que son poco productivas inclusive algunas con caudales menores a 1 m^3/h. En definitiva, además de la presencia de discontinuidades, otros aspectos pueden influir en el potencial hidrogeológico de la zona: tipo y densidad de discontinuidades, interconexión entre las mismas, presencia o no de relleno en las fracturas [Roehe Reginato & Strieder -2006].

Las estructuras horizontales más importantes desde el punto de vista del potencial hidrogeológico son la interface localizada en el contacto entre dos derrames superpuestos o simplemente zonas interderrames. Es importante tener en cuenta que estas zonas interderrames no son homogéneas. Como se vio en el capítulo geología descriptiva en el área piloto (al igual que sucede en el distrito minero Los Catalanes - Techera J. et al 2007) la zona

interderrame, en especial el tope de los derrames puede presentar variaciones laterales: de textura, estructuras y de espesor, así como la presencia o no de procesos secundarios (alteración meteórica y/o hidrotermal, interacción con areniscas). Estas variaciones laterales seguramente repercuten en forma positiva o negativa en la porosidad y capacidad de trasmitir agua de la zona inetrderrame.

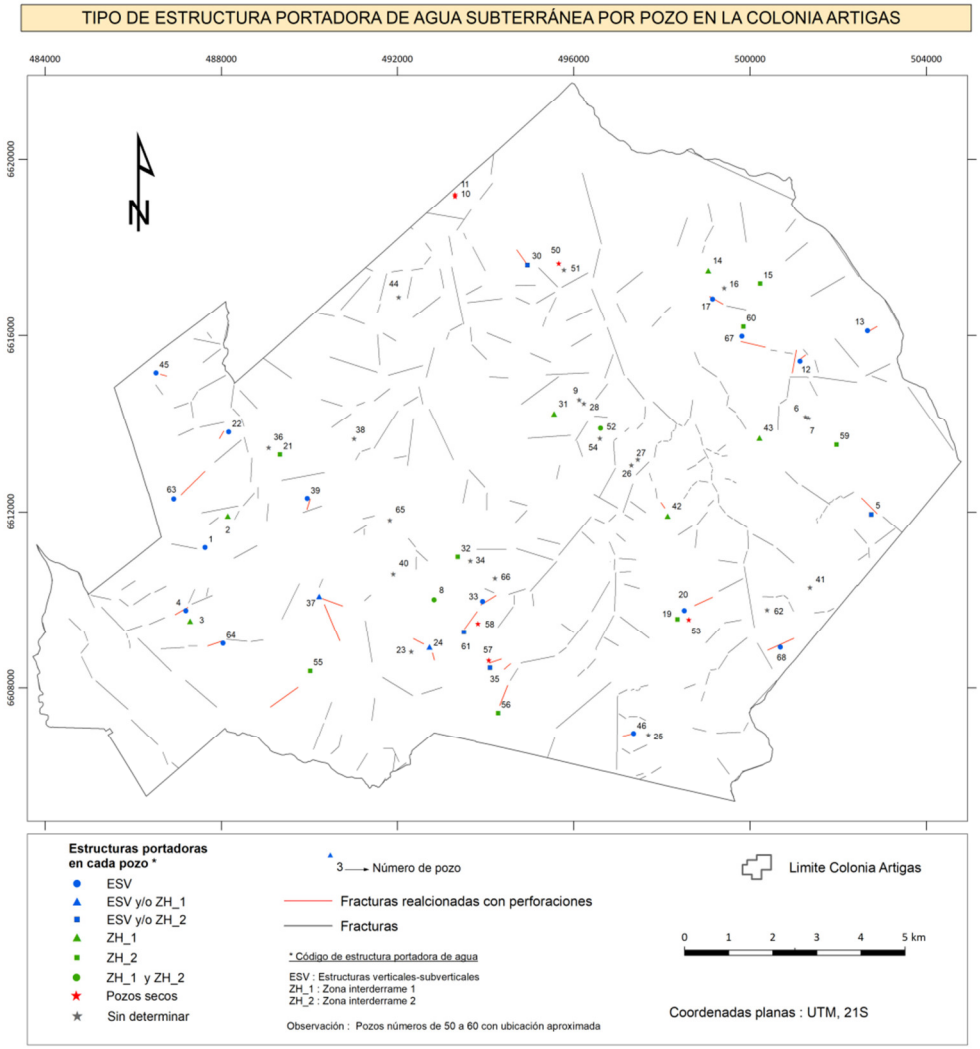
El potencial para almacenar agua subterránea de las estructuras horizontales depende de factores intrínsecos y factores extrínsecos. Los primeros tienen que ver con la porosidad-permeabilidad y espesor de las estructuras horizontales y los extrínsecos con la presencia de estructuras verticales-subverticales relativamente cercanas (via de entrada de agua al sistema) y que intersecten a las estructuras horizontales (conexión hidráulica).

Para la zona de estudio varias perforaciones captarían agua de las zonas interderrame 1 y/o 2, en especial aquellos pozos sin estructuras verticales-subverticales cercanas (categoría 3).

Esto es más evidente, en aquellas perforaciones en donde la ubicación de la(s) napa(s) coincide o está en el entorno de la profundidad estimada de la interface derrame 2/derrame 1 (zona interderrame somera) e interface derrame 1/derrame A (zona interderrame profunda).

Como síntesis, en la colonia Artigas varias perforaciones captan agua de estructuras verticales-subverticales (fracturas), en otras el nivel portador estaría representado por las zonas interderrames y en otras posiblemente una combinación de ambos tipos de estructuras. (Figuras 24 y Cuadro 5). Este modelo de flujo posiblemente se repita en otras regiones del acuífero Arapey.

Por último las zonas ineterderrames con capacidad de almacenar/circulación de agua, podrían jugar un papel importante en la conexión hidráulica entre fracturas profundas cercanas, generando un sistema acuífero complejo local.



Figuras 24 : Interpretación de tipo de estructuras portadoras de agua por pozo en la colonia Artigas.

8.3. Prospección y ubicación de pozos en el acuífero volcánico Arapey

Como todo acuífero fracturado, el acuífero Arapey presenta una importante heterogeneidad en sus aspectos hidrogeológicos producto que las estructuras portadoras de agua subterránea son discretas y discontinuas. En la práctica esto se traduce en la existencia frecuente de pozos productivos a muy productivos, cerca espacialmente de pozos poco productivos o inclusive secos. Por lo que es aconsejable en lo posible realizar tareas de prospección de agua subterránea en la región a ejecutar las perforaciones y utilizar criterios geológico-estructurales adecuados para mejorar las posibilidades de ubicar pozos productivos dentro de una región prospectada.
La metodología propuesta es básicamente la ya planteada para el estudio de la zona piloto de la colonia Artigas, acá solo se presenta un resumen a manera de síntesis y algunos criterios para ubicar perforaciones en este tipo de acuífero particular :

La primera fase es el levamiento de la información geológica-estructural e hidrogeológica del área en estudio y posterior procesamiento, análisis e integración espacial de los datos, con actividades tanto de gabinete como de campo.
En una segunda fase es la generación y utilización de diferentes capas de información georeferenciada cuyo procesamiento, integración y análisis es facilitado con el uso de un programa GIS y herramientas de procesamiento de datos espaciales.

Material base y productos auxiliares a utilizar

- ✓ Geología de la zona, con especial énfasis en identificar y mapear los límites de derrames y sus características estructurales-texturales
- ✓ Descripción e interpretación de pozos con perfiles litológicos.
- ✓ Carta con identificación y mapeo de fracturas así como datos de porte y dirección.
- ✓ Relevamiento de perforaciones, con ubicación precisa y datos hidrogeológicos básicos (profundidad, caudal, ubicación de napas).
- ✓ Material auxiliar : mapa topográfico/modelo de elevación, fotos aéreas-imágenes satelitales, capa de red de drenaje, etc.

Algunos criterios de localización de perforaciones son comunes a cualquier acuífero fisurado, otros son particulares de este tipo de reservorio volcánico :

- ✓ Como todo acuífero fracturado, las discontinuidades de mayor recorrido (porte) que en general coinciden con de mayor desarrollo vertical (penetración) son las más favorables.
- ✓ El entrecruzamiento de fracturas también puede ser una situación más favorable que fracturas aisladas, en especial si existe interconexión hidráulica.

- ✓ Puede existir cierta correlación entre algunas direcciones de discontinuidades y pozos productivos. En este caso, las fracturas paralelas a esta(s) dirección(es) son las prioritarias a la hora de ubicar pozos.
- ✓ Las estructuras horizontales, en especial las zonas interderrames son potencialmente favorables para contener agua subterránea. Por lo que áreas con derrames poco potentes, permiten alcanzar una o varias de estas zonas a relativamente poca profundidad, aumentando las posibilidades de alumbramiento de agua.
- ✓ Zonas de posible intersección entre trazas de fracturas encubiertas y zonas interderrames no aflorante pueden ser también favorables.
- ✓ Por lo contrario, áreas con pocas fracturas y de poco desarrollo, zonas topográficamente altas y muy disecadas, derrames espesos y macizos son todas condiciones poco favorables para localizar pozos productivos.

9. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Athayde B. G.; de Vasconcelos C.; da Rosa Filho E. e Chemas Hindi E. (2007) : Estudo sobre os tipos das águas do aquífero Serra Geral, no município de Marechal Cândido Rondon - PR. Águas Subterrâneas, v.21, n.1, p.111-122.

Abelenda E. (2016) : Caracterización Hidrogeoquímica e Hidrodinámica y Estimación de la recarga de los acuífero Salto y Arapey, Salto, Uruguay. Tesis de Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias - Udelar.

Baksi Ajoy K. (2018) : Paraná flood basalt volcanism primarily limited to ~1 Myr beginning at 135Ma: New 40Ar/39Ar ages for rocks from Rio Grande do Sul, and critical evaluation of published radiometric data. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 355, 66-77.

Berretta E. J. (1998) : Principales características climáticas y edáficas de la región de basalto en Uruguay. Seminario de Actualización en Tecnologías para Basalto, INIA Tacuarembó.

Bossi Jorge; Heide E. y de Oliveira T. (1969) : Carta Geológica del Uruguaya escala 1/100.000, Segmento Salto, Sectores XIX y XX. Departamento de publicaciones de la Universidad. Montevideo.

Bossi J. y Heide E. (1970) : Carta Geológica del Uruguaya escala 1/100.000, Segmento Río Arapey, Sector XVIII. Departamento de publicaciones de la Universidad. Montevideo.

Bossi J.; Ledesma J. y Carballo E. (1973) : Síntesis general de los trabajos geológicos realizados en el área basáltica. Programa basalto, Cátedra de Geología , Facultad de Agronomía , Plan Agropecuario (Informe mimeografiado).

Bossi J. y Schipilov A. (1998) : Rocas Ígneas Básicas del Uruguay, Volúmen I. Departamento de Publicaciones de la Facultad de Agronomía, Montevideo.

Bossi J. y Ferrando L. (2001): Carta geológica del Uruguay a escala1:50.000. Versión CD-Rom, Geoeditores, Montevideo.

CONSUR (1995) : Estudio del acuífero Salto. PRENADER MGAP/MTOP/Banco Mundial.

Da Silva A. B. (1984) : Evolução química das águas subterráneas. Revista de Águas Subterrâneas, ABAS, v.7, n.1.

De Freitas M.; Caye B. e Flores Machado J. (2002): Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do Estado de Santa Catarina - Projeto Oeste de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM/SDM-SC/SDA-SC/EPAGRI.

De Freitas M.; Roisenberg A. e Silva Andriotti J. (2016) : Análise exploratória de dados da condutividade elétrica nas águas do sistema aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Águas Subterrâneas, 30(1): 1-17.

Fernandes A. J. ; Maldaner C. H. ; Negri F. ; Rouleau A. and Wahnfried I. D. (2016) : Aspects of a conceptual groundwater flow model of the Serra Geral basalt aquifer (Sao Paulo, Brazil) from physical and structural geology data. Hydrogeology Journal , 24:1199–1212.

Fraga C. G. (1986) : Introdução ao zoneamento do sistema aquifero Serra Geral no estado do Paraná. Dissertaçao de mestrado. Universidade de Sao Paulo. instituto de Geociências. São Paulo.

Frank H. T. (2008) : Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na formação Serra Geral (bacia do Paraná). Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Hausman A. y Fernández A. (1967) : Hidrogeología de los basaltos del NW, Universidad de la República , Comisión de investigación científica, Facultad de Agronomía, Uruguay.

Hon K.; Kauahikaua J. ; Denlinger R. and Mackay K. (1994) : Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows : Observations and measuremets of active flows on Kilauea Voncano, Hawaii. Geological Society of America Bulletin, v. 106, p. 351-370.

Lastoria G.; Sinelli O.; Chang Hung K.; Hutcheon I; Paranhos A. e Gastmans D. (2006) : Hidrogeologia da formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. Revista de Águas Subterrâneas, ABAS, v.20, n.1, p.139-150.

Marmisolle J. (2015) : Análisis tectonosedimentario de depocentros en el sector Noroeste de Cuenca Norte. Udelar, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas. Tesis de maestría en Geociencias.

Manasses F. (2009) : Caracterização hidroquímica da água subterrânea da formação Serra Geral na região sudoeste do estado do Paraná. Tese de Mestre em Geologia Ambiental, Curso de Pós- Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.

Manasses F.; Da Rosa Filho E.; Chemas Hindi E. e Lima Bittencourt A. (2011) : Estudo hidrogeológico da Formação Serra Geral na região sudoeste do estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências 64-65 (2011) 59-67.

Ministerio de Agricultura y Pesca (1976) : Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000. Dirección de Suelos y Fertilizantes.

Nanni, A. S. (2008) : O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Preciozzi F., Spoturno J., Heinzen W. y Rossi P. (1985) : Carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000 . Dinamige, Montevideo, Uruguay.

Reginato R. e Strieder A. (2006) : Caracterização estrutural dos aqüíferos fraturados da Formação Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Geociências, volume 36.

Reginato R. (2007) : Comportamento hidrodinâmico de poços tubulares associados a aquiferos fraturados condicionados por estruturas primárias das rochas vulcânicas. XVII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos- São Paulo.

Reginato P.; Ahlert S.; Finotti A.; Schneider V. e Gilioli K. (2010) : Qualidade das águas subterrâneas de diferentes aquíferos associados à formação Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços.

Reginato P.; Ahlert S. ; Finotti A. e Schneider V. (2013) : Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Serra Geral na região nordeste do Rio Grande do Sul, Águas Subterrâneas. (ABAS) 27(1): 65-78.

Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (2015) : Caracterização hidroquímica do aquífero Serra Geral. Carta das águas subterrâneas do Paraná. Ministério do Meio Ambiente, Brasília.

Self S.; Keszthelyi L. and Thordarson T. (1998) : The importance of pahoehoe. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 26:81–110.

SIAGAS : Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, CPRM (Servico Geológico de Brasil), http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php.

Soto M. (2014) : Geología, geofísica y geoquímica de la región de Pepe Núñez, Cuenca Norte (Uruguay). Udelar, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas. Tesis de maestría en Geociencias.

Santos Barreto C. J.; Fernandes E. ; Marlon C. and de Magalhães L. (2014) : Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. Journal of Volcanology and Geothermal Research 285, pp 81–99.

Szikszay M. (1993) : Geoquímica das águas. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Boletim IG-USP, Série Didática.

Techera J.; Judith L. y Spoturno J. (2007) : Proyecto ágatas y amatistas Fase I : Cartografía geológica y relevamiento minero en el distrito gemológico Los Catalanes.

Techera J. (2011) : Proyecto ágatas y amatistas Fase II : Exploración detallada de los yacimientos de amatista en el distrito gemológico Los Catalanes.

Thiede D. and Vasconcelos P. (2010) : Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new 40Ar/39Ar results. Geological Society of America, 2010; v. 38; no. 8; p. 747–750.

10. ANEXOS

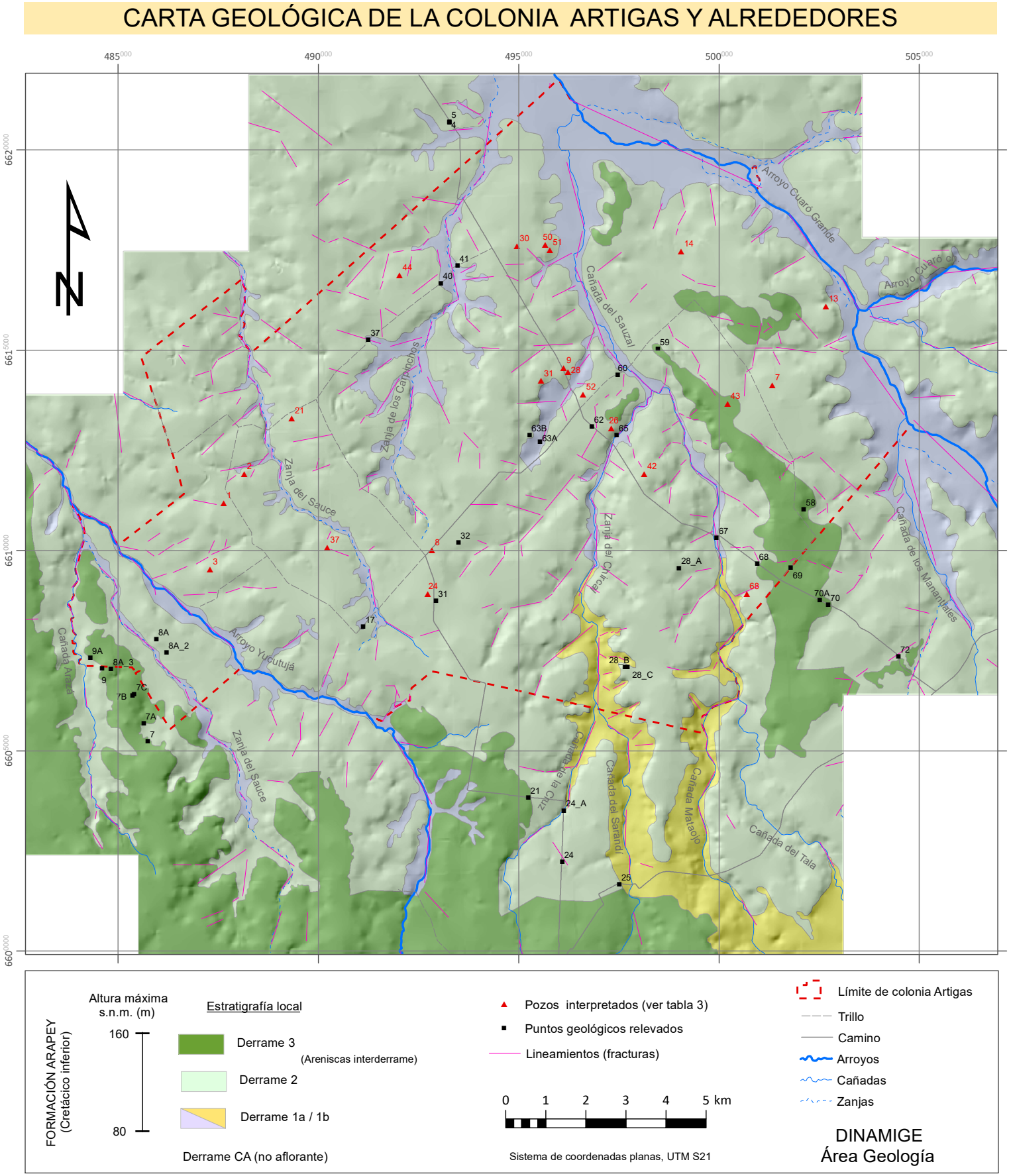


Figura 13 : Carta geológica de la colonia Artigas y alrededores

Número	Nº Perforación	X_{UTM}	Y_{UTM}	Z(m)	Intervalo (m)	Descripción testigos	Intervalo (m)	Descripción Perforador
8	**A 832/1**	492834	6610000	125	0 a 10	basalto masivo	0 a 22	basalto marrón
					10 a 15	basalto vesicular	22 a 29,5	basalto marrón duro
					15 a 20	basalto vesicular mas fresco	29,5 a 45	basalto gris duro
					20 a 50	basalto masivo	45 a 52	basalto marrón duro
					50 a 55	basalto vesicular algo alterdo con cuarzo	52 a 55	basalto marrón blando
26	**A 832/2**	497308	6613052	100	0 a 15	basalto masivo y vesicular	0 a5	basalto marrón
					15 a 25	basalto masivo	5 a 15	basalto gris duro
					25 a 35	basalto vesicular	15 a 25	basalto marrón duro
					35 a 85	basalto masivo	25 a 35	basalto marrón blando
					85 a 90	basalto masivo más blando	35 a 63,65	basalto gris duro
							63,65 a 65	basalto gris duro
							65 a 70	basalto marrón duro
							70 a 73,60	basalto gris semi duro
							73,60 a 80	basalto gris duro
							80 a 85	basalto marrón duro
							85 a 95	basalto marrón
9	**A 832/3**	496123	6614549	97	0 a 15	basalto vesicular blando muy alterado	0 a 15	basalto marrón
					15 a24	basalto masivo duro	15 a 19,4	basalto gris semi duro
					24 a 28	basalto masivo rojizo	19,4 a 24	basalto gris duro
							24 a 28	basalto marrón blando
44	**A 832/4**	492026	6616879	97	0 a 5	basalto vesicular alterado gris	0 a 4,4	basalto marrón y gris
					5 a 17	basalto masivo	4,4 a 7,5	basalto gris duro
					17 a 24	basalto masivo algo alterado	7,5 a 8,5	basalto marrón
					24 a 50	basalto masivo	8,5 a 10,5	basalto marrón duro
					50 a 55	basalto vesicular ??	10,5 a 12,45	basalto marrón duro con desmoronamiento
					55 a 75	basalto masivo	12,45 a 13,6	basalto marrón blando
					75 a 81,5	basalto masivo a vesicular	13,6 a 15,5	basalto marrón semi duro
							15,5 a 17	basalto gris duro
							17 a 24	basalto marrón semi duro
							24 a 40	basalto gris duro
							40 a 45,6	basalto marrón duro
							45,6 a 51	basalto marroón blando
							51 a 54,8	basalto gris descompuesto
							54,8 a 61	basalto gris duro
							61 a 75	basalto marrón duro
							75 a 80	basalto marrón blando
52	**A 832/5**	496608	6613889	91	0 a 10	basalto marrón alterado (vesicular)	0 a 13,50	basalto marrón partes blando y partes semi duro
					10 a 30	basalto masivo alterado	13,50 a 15,00	basalto marrón
					30 a 39	basalto masivo	15,00 a 23,20	basalto gris
					39 a 41,50	basalto masivo a vesicular, alterado	23,20 a 28,40	basalto gris duro
							28,40 a 30,00	basalto gris
							30,00 a 39,20	basalto gris duro
							39,20 a 41,50	basalto marrón blando
25	**A 832/6**	497697	6606934	131	0 a 28	basalto vesicular alterado marrón	0 a 4,35	basalto marrón
							4,35 a 28,00	basalto marrón partes blando y partes semi duro
14	**A 832/7**	499054	6617474	91	0 a 10	basalto masivo a vesicular	0 a 10	basalto marrón
					10 a 25	basalto masivo	10 a 13,20	basalto marrón duro
					25 a 30	basalto masivo alterado	13,20 a 25	basalto gris duro
					30 a 38	basalto vesicular	25 a 38	basalto marrón blando
					38 a 54	basalto masivo	38 a 41,80	basalto gris duro
					54 a 61	basalto masivo algo alterado	41,80 a 44,45	basalto gris muy duro
							44,45 a 50,35	basalto gris duro
							50,35 a 53,45	basalto gris semi duro
							53,45 a 54	basalto gris
							54 a 60	basalto marrón semi duro
							60 a 61	basalto gris duro
42	**A 832/9**	498131	6611908	116	0 a 5	basalto vesicular	0 a 3,50	basalto marrón blando con desmoronamiento
					5 a 24	basalto masivo	3,50 a 9,0	basalto marrón blando
					24 a 35	basalto masivo a vesicular	9 a 15	basalto marrón duro
							15 a 24	basalto gris duro
							24 a 35	basalto marrón blando
							35 a 36	basalto gris semi duro
3	**A 832/10**	487291	6609523	112	0 a 8	basalto vesicular	0 a 5,30	basalto marrón blando
					8 a 20	basalto masivo	5,30 a 8	basalto marrón
					20 a 22,50	basalto masivo algo alterado, con vesículas	8 a 14,80	basalto gris duro
							14,8 a 22,5	basalto gris blando
2	**A 832/11**	488146	6611911	112	0 a 3,5	basalto vesicular	0 a 3,5	basalto marrón
					3,5 a 11	basalto masivo	3,5 a 10	basalto gris duro
					11 a 12	basalto masivo a vesicular	10 a 10,5	basalto marrón con desmoronamiento
							10,5 a 12	basalto gris con desmoronamiento
50	**A 832/12**	495661	6617636	90	0 a 6	basalto visicular muy alterado	0 a 6,0	basalto marrón blando, se desmorona
					6 a 10	basalto vesicular	6,0 a14,7	basalto gris semi duro
					10 a 22	basalto masivo	14,7 a 22	basalto gris duro
					22 a 25	basalto masivo con colores rojizos	22 a 30	Basalto marrón semi duro
					25 a 44	basalto vesicular	30 a 39,8	alternacia de basaltos grise y marrnes semi duros
							39,8 a 44	basalto gris duro
51	**A 832/13**	495776	6617492	86	0 a 3	basalto vesicular	0 a 3	basalto marrón c/desmoronamiento
					3 a 18	basalto masivo	3 a 19	basalto gris duro
					18 a 40	basalto masivo a vesicular rojizo	19 a 28	basalto marrón
					40 a 50	basalto masivo gris	28 a 70	basalto gris marrón semi duro
					50 a 64	basalto masivo a vesicular rojizo		
					64 a 65	basalto masivo gris		
					65 a 70	falta testigo		
37	**A 832/14**	490219	6610082	121	0 a 5	basalto vesicular marrón muy alterado	0 a 3,1	basalto marrón con desmoronamiento
					5 a 20	basalto masivo fresco rojizo	3,1 a 5	basalto gris
					20 a 30	basalto masivo fresco marrón claro	5 a 23,6	basalto marrón
					30 a 36	basalto masivo a vesicular rojizo	23,6 a 30	basalto marrón semi duro
							30 a 36	basalto marrón

Tabla 1a : Descripción de pozos de la colonia Artigas. Fuente Dinamige

Número	Nº Perforación	X UTM	Y_{UTM}	Z(m)	Intervalo (m)	Descripción testigos	Intervalo (m)	Descripción Perforador
21	**A 832/15**	489335	6613293	110	0 a 20	basalto masivo gris	0 a 10	basalto gris duro
					20 a 25	basalto rojizo con vesículas	10 a 18,1	basalto marrón duro
					25 a 35	basalto masivo rojizo	18,1 a 27,2	basalto marrón
					35 a 40	basalto masivo a vesicular rojizo	27,2 a 30,7	basalto marrón duro
							30,7 a 35,5	basalto marrón
							35,5 a 40	basalto marrón blando
43	**A 832/16**	500215	6613669	112	0 a 12	basalto vesicular marrón alterado	0 a 12	basalto marrón blando
					12 a 19	basalto masivo, freco, rojizo	12 a 14	basalto marrón duro
							14 a 19	basalto marrón semi duro
30	**A 832/17**	494952	6617598	95	0 a 35	basalto masivo gris	0 a 5,5	basalto marrón con desmoronamiento
					35 a 45	basalto masivo a vesicular rojizo	5,5 a 27	basalto gris duro
					45 a 55	basalto masivo rojizo	27 a 33	basalto gris semi duro
					55 a 60	basalto masivo a vesicular rojizo	33 a 35	basalto gris duro
					60 a 70	basalto masivo gris	35 a 37	basalto marrón duro
							37 a 65	basalto marrón
							65 a 67	basalto gris
							67 a 67,7	basalto gris semi duro
							67,7 a 70	basalto gris duro
1	**A 832/18**	487635	6611183	121	0 a 5	basalto vesicular marrón alterado	0 a 5,8	basalto marrón con desmoronamiento
					5 a 10	basalto masivo a vesicular gris	5,8 a 8,1	basalto marrón
					10 a 15	basalto masivo gris	8,1 a 14,7	basalto marrón con desmoronamiento
24	**A 832/19**	492727	6608922	130	0 a 5	basalto vesicular rojizo alterado	0 a 19	basalto marrón
					5 a 20	basalto vesicular rojizo menos alterado	19 a 24	basalto marrón semi duro
					20 a 41	basalto masivo rojizo	24 a 33	basalto gris
					41 a 46	basalto masivo a vesicular rojizo	33 a 34	basalto marrón semi duro
					46 a 50	basalto vesicular marrón alterado	34 a 52	basalto marrón
					50 a 52	basalto masivo gris		
31	**A 832/20**	495556	6614229	109		Sin testigos	0 a 3,5	basalto descompuesto con desmoronamiento
							3,5 a 14	basalto marrón
							14 a 28,5	basalto marrón duro
							28,5 a 29	basalto marrón con desmoronamiento
							29 a 29,3	basalto marrón

Tabla 1a : Continuación

Número	X_utm	Y_utm	H_elipsoidal	H_renare	PROF_m	Int._1	Litología_1	Int._2	Litología_2	Int.3	Litología_3	Int.4	Litología_4	Int.5	Litología_5	Int.6	Litología_6	Int.7	Litología_7	Int.8	Litología_8	Int.9	Litología_9	Int.10	Litología_10
67	499816	6615977		99	55	0-1	arcilla	1-7	Basalto, marrón, alterado	7-12	Basalto, marrón, fracturado	12-19	Basalto, negro, fracturado	19-22	Basalto, marrón	22-27	Basalto, negro	27-32	Basalto, marrón	32-44	Basalto, marrón, fracturado	44-52	Basalto, marrón	52-55	Basalto
13	502671	6616101	89	95	28	0-1	suelo arcilloso	1-3	basalto alterado con intensa meteorización	3-10	basalto masivo fracturado y alteración con arcilla	10-13	basalto con leve alteración, sin fracturación, negro	13-19	basalto masivo con escasa fracturación, marrón oscuro	19-22	basalto con escasa alteración y fracturación, marrón	22-25	basalto vacuolar con presencia de óxidos metálicos y carbonato de Ca	25-28	idem anterior con abundante arcilla				
16	499415	6617087	98	98	55	0-1	arcilla	1-3	Basalto alterado	3-4	Basalto, negro	4-22	Basalto, marrón, fracturado	22-37	Basalto, marrón alterado	37-43	Basalto, negro	43-49	Basalto, marrón	49-55	Basalto, negro.				
7	501330	6614125	113	112	37	0-4		4-7	basalto masivo fracturado sin alteración, marrón claro	7-19	basalto fisurado con arcillas	19-31	basalto vacuolar fracturado con cuarzo y carbonato de calcio, marrón	31-37	idem anterior con vacuolas de mayor tamaño	37-37.5	basalto masivo fresco								
17	499152	6616834	96	94	35	0-6	basalto marrón alterado	6-8	basalto fracturado y alterado	8-14	basalto negro	14-22	basalto rojizo	22-28	basalto negro	28-35	basalto rojizo								
27	497452	6613184	99	98	45	0-1	Basalto alterado	1-5	Basalto negro	5-26	Basalto marrón	26-28	Basalto negro	28-32	Basalto marrón	32-45	Basalto negro.								
28	496231	6614461	95	94	50	0-6	Basalto muy alterado	6-8	Basalto marrón duro	8-34	Basalto negro duro	34-40	Basalto marrón alterado	40-48	Basalto vacuolar rojo	48-60	Basalto negro								
68	500691	6608921		109	25	0-1	suelo arcilloso	1-2	basalto masivo, fracturado sin alteración	2-3	basalto fisurado con arcilla	3-21	basalto con leve alteración, fisurado	21-26	basalto vacuolar alterado con calcio y carbonato de calcio	21-26.5	basalto masivo poco alterado y fisurado								
45	486523	6615150	109	105	30,5	0-2	suelo	2-16	basalto lajoso fracturado gris	16-19	basalto fisurado sin alteración negro	19-30	idem anterior con menor grado de fracturación												
4	487197	6609758	108	106	30	0-2	suelo	2-25	basalto masivo fracturado y alteración con arcilla	25-28	basalto fisurado con levea alteración	28-31	basalto masivo, fracturado con óxidos metálicos y minerales de cobre												

Tabla 1b : Descripción de pozos de la colonia Artigas. Fuente Prenader

Código	Nº Perforación	Espesor estimado de la colada 2 (m)	Estratigrafia interpretada	Intervalo (m)	* Zona Interderderrame 1	* Zona Interderderrame 2
1	A 832/18	9 a 11	C2_i	0	11 m	> 15 m
			C2_f	11		
			C1_i	11		
			C1_f	hasta 15		
2	A 832/11	2 a 4	C2_i	0	4m	> 12 m
			C2_f	4		
			C1_i	4		
			C1_f	hasta 12		
3	A 832/10	9 a 11	C2_i	0	11 m	> 22 m
			C2_f	11		
			C1_i	11		
			C1_f	hasta 22		
7	Prenader	18 a 21	C2_i	0	21 m	> 37 m
			C2_f	21		
			C1_i	21		
			C1_f	> 27		
8	A 832/1	10 a 13 m	C2__i	0	13 m	52 m
			C2__f	13		
			C1__i	13		
			C1__f	52		
			CA	hasta 55		
9	A 832/3	1 a 4	C2_i	0	4 m	> 28 m
			C2_f	4		
			C1_i	4		
			C1_f	> 28		
13	Prenader	3 a 7	C2_i	0	7 m	> 28 m
			C2_f	7		
			C1_i	7		
			C1_f	> 28		
14	A 832/7	4 a 8	C2_i	0	8 m	38 ?
			C2_f	8		
			C1_i	8		
			C1_f	25 a 38		
			CA_i	25 a 38		
			CA_f	hsata 61 ?		
21	A 832/15	7 a 11	C2_i	0	11 m	40 m ?
			C2_f	11		
			C1_i	11		
			C1_f	hasta 40		
24	A 832/19	14 a 15	C2_i	0	15 m	41-50 m
			C2_i	15		
			C1_i	15		
			C1_f	41 a 50		
			CA_i	41 a 50		
			CA_f	> 52		
26	A 832/2	10 a 12 m	C2__i	0	12 m	35m ?
			C2__f	12		
			C1_i	12		
			C1_f	35 ?		
			CA_i	35 ?		
			CA_f	hasta 90 m ?		

Tabla 2 : Estraftigrafia interpretada del sub-suelo de la colonia Artigas (ver texto para detalles)

Código	Nº Perforación	Espesor estimado de la colada 2 (m)	Estratigrafia interpretada	Intervalo (m)	* Zona Interderderrame 1	* Zona Interderderrame 2
28	Prenader	1 a 2	C2_i	0	15 m	40-48 m
			C2_i	2		
			C1_i	2		
			C1_f	40-48		
			CA_i	40-48		
			CA_f	> 60		
30	A 832/17	5 a 8	C2_i	0	8 m	45 m ?
			C2_f	8		
			C1_i	8		
			C1_f	45 ?		
			CA_i	45 ?		
			CA_f	hasta 70 ?		
31	A 832/20	8 a 5	C2_i	0	8 m	> 29 m
			C2_f	8		
			C1_i	8		
			C1_f	hasta 29		
37	A 832/14	7 a 9	C2_i	0	9 m	> 36
			C2_f	9		
			C1_i	9		
			C1_f	hasta 36		
42	A 832/9	22 a 24	C2_i	0	24 m	> 36 m
			C2_f	24		
			C1_i	24		
			C1_f	hasta 36		
43	A 832/16	17 a 21	C2_i	0	21 m	> 21
			C2_f	21		
			C1_i	21		
			C1_f	> 21		
44	A 832/4	5 a 12	C2_i	0	12 m	55 m
			C2_f	12		
			C1_i	12		
			C1_f	55		
			CA_i	55		
			CA_f	hasta 80 ?		
50	A 832/12	4 a 8	C2_i	0	8 m	44 m ?
			C2_f	8		
			C1_i	8		
			C1_f	44		
51	A 832/13	0 a 1	C2_i	0	1 m	40 m ?
			C2_f	1		
			C1_i	1		
			C1_f	40 ?		
			CA_i	40 ?		
			CA_f	hasta 70 ?		
52	A 832/5	7 a 9	C2_i	0	9 m	41,5 m?
			C2_f	9		
			C1_i	9		
			C1_f	41,5 ?		
68	Prenader	3 a 5	C2_i	0	5 m	41-50 m
			C2_i	5		
			C1_i	5		
			C1_f	26		
			CA_i	41 a 50		
			CA_f	> 52		

C2i = inicio de colada 2 y C2f = fin de colada 2, ídem para C1 y CA / * ubicación en profundidad de las zonas inetrderrames

Tabla 2 : continuación

Numero	Codigo	Fuente	X_utm	Y_utm	H_Elips. (m)	H_Renare (m)	Profund. (m)	Prof. Napa_1 (m)	Prof. Napa_2 (m)	Q (m^3/h)	NE_m	ND_m
1	A 832/18	Dinamige	487635	6611183	124	121	14,7	8		2,4	2	13,7
2	A 832/11	Dinamige	488146	6611911	116	112	18	6,5		8,8	3,6	6,8
3	A 832/10	Dinamige	487291	6609523	112	112	22,5	7	20,5	2,6	4,3	20,8
4	Prenader	Prenader	487197	6609758	108	106	31			5	2	6,5
5	B 514	Hidrosa	502752	6611941	102	100	48	47		1,8		
6	B 520	Hidrosa	501259	6614155	113	111	124,6	0		0,8		
7	Prenader	Prenader	501330	6614125	113	112	38			2	10	28,5
8	A 832/1	Dinamige	492834	6610000	135	125	55	18	52	2,6	14	34,3
9	A 832/3	Dinamige	496123	6614549	102	97	28	25		4,4	8,8	25,3
10	Pozo nuevo	Pozo Nuevo	493306	6619168	94	88	60			Seco		
11	Pozo nuevo	Pozo Nuevo	493305	6619207	95	88	60			Seco		
12	B 517	Hidrosa	501139	6615414	100	101	61	60		2,2		
13	Prenader	Prenader	502671	6616101	89	95	28			2	5	
14	A 832/7	Dinamige	499054	6617474	91	91	61	10	35	0,9	6,8	34,8
15	B 518	Hidrosa	500230	6617183	105	105	39	38		6		
16	Prenader	Prenader	499415	6617087	98	98	55			2	3	7
17	Prenader	Prenader	499152	6616834	96	94	35			3	2,5	29,4
18	A 832/5	Dinamige	498201	6615274	100	91				s/d		
19	B 512	Hidrosa	498354	6609563	128	125	40	39		1,5		
20	Pozo nuevo	Pozo nuevo	498509	6609756	124	121	57			1,2		
21	A 832/15	Dinamige	489335	6613293	102	110	40	21	38	3,7	14	30,3
22	Pozo nuevo	Ramiro Silva	488171	6613802	104	100	35	22	30	4,5		
23	B 506	Hidrosa	492310	6608817	131	130	70,4	69		3		
24	A 832/19	Dinamige	492727	6608922	131	130	52	16		2,2	12	34,3
25	A 832/6	Dinamige	497697	6606934	131	131	28	17	24	4,5	15	25,3
26	A 832/2	Dinamige	497308	6613052	105	100	95	33		0,7	17,2	34
27	Prenader	Prenader	497452	6613184	99	98	45			5	13	13,8
28	Prenader	Prenader	496231	6614461	95	94	60			6	10	15
30	A 832/17	Dinamige	494952	6617598	100	95	70	5,5		0,6	3	34,3
31	A 832/20	Dinamige	495556	6614229	105	109	29,3	10		2,3	7	16,3
32	B 510	Hidrosa	493370	6610967	127	117	52	50		4,8		
33	Pozo Nuevo	Pozo Nuevo	493934	6609964	116	115	16			16		
34	Pozo Nuevo	Pozo Nuevo	493653	6610879	133	120				s/d		
35	B 524	Hidrosa	494102	6608455	135	130	53	50		7		
36	B 501	Hidrosa	489078	6613451	98	103	120	90		1,8		
37	A 832/14	Dinamige	490219	6610082	121	121	36	9	33	6,6	10,5	34,3
38	B 511	Hidrosa	491016	6613655	112	115	96,5	95		2,2		
39	B 522	Hidrosa	489952	6612303	119	119	96	95		1,4		
40	Pozo nuevo	Privado	491904	6610586	125	121	36			1		
41	B 513	Hidrosa	501363	6610283	118	119	60,5	59		4,5		
42	A 832/9	Dinamige	498131	6611908	112	116	36	27		1,1	23,4	34,8
43	A 832/16	Dinamige	500215	6613669	109	112	19	17		6,6	11,3	16,6
44	A 832/4	Dinamige	492026	6616879	101	97	81,5	79		1,2	6,25	33,9
45	Prenader	Prenader	486523	6615150	109	105	31			1	1	25
46	Pozo Nuevo	Pozo Nuevo	497358	6606965	119	119	86	21		0,5		

Tabla 3a : Tabla de perforaciones de colonia Artigas (con ubicación precisa). H. Renare = altura en metros extraída del MDE de Renare

Numero	Codigo	Fuente	X_utm	Y_utm	H_Elips. (m)	H_Renare (m)	Profund. (m)	Prof. Napa_1 (m)	Prof. Napa_2 (m)	Q (m^3/h)	NE_m	ND_m
50	A 832/12	Dinamige	495661	6617636		90	44			Seco		
51	A 832/13	Dinamige	495776	6617492		86	70	22		0,8	8	35,7
52	A 832/5	Dinamige	496608	6613889		98	41,5	14	39,5	4,8	12	34,3
53	B 379	Hidrosa	498610	6609553		121	90	0		Seco		
54	B 504	Hidrosa	496596	6613659		101	60,5	57		2,6		
55	B 505	Hidrosa	490134	6608433		127	51,3	48		4,5		
56	B 507	Hidrosa	494136	6607440		129	52	50		2,8		
57	B 508	Hidrosa	494153	6608464		128	137	0		Seco		
58	B 509	Hidrosa	493888	6609650		121	23,5	0		seco		
59	B 515	Hidrosa	501966	6613519		112	45,6	44		4,5		
60	B 516	Hidrosa	499698	6616147		100	57	53		6		
61	B 519	Hidrosa	493510	6609263		120	55	54		3,2		
62	B 521	Hidrosa	500316	6609777		109	107	0		0,6		
63	B 523	Hidrosa	486944	6612140		118	67	63		2,4		
64	B 525	Hidrosa	488122	6608882		109	72,5	70		8		
65	Prenader	Prenader	493391	6611022		108	45			2	5	25
66	Prenader	Prenader	494211	6610489		115	40			5	15	
67	Prenader	Prenader	499816	6615977		99	55			3	3,6	18
68	Prenader	Prenader	500691	6608921		109	27			5	10	12

Tabla 3b : Tabla de perforaciones de colonia Artigas (con ubicación estimada)