

ZONIFICACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN URUGUAY: UNA GUÍA ORIENTATIVA PARA SU GESTIÓN Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

ZONING OF THE GUARANÍ AQUIFER SYSTEM IN URUGUAY: A SUGGESTED GUIDE FOR ITS ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AND PROTECTION

Veroslavsky, Gerardo¹; Manganelli, Alberto²

Resumen

Se propone la zonificación del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay, sobre la base de criterios geológicos, hidrogeológicos y de usos del recurso, con el propósito de generar pautas que puedan ser consideradas en la gestión y protección ambiental del recurso. Se definen y caracterizan tres zonas, a saber: i) la Zona A, que incluye el área de afloramiento de las unidades físicas que componen el acuífero sumado a un área de seguridad o buffer. Constituye el área de mayor vulnerabilidad y sensibilidad ambiental, siendo además la fuente más importante de agua subterránea para el abastecimiento de la población; ii) la Zona B donde el acuífero se desarrolla a profundidades variables que oscilan desde algunos metros a centenas de metros y se encuentra casi totalmente protegido por los basaltos, proponiéndose a su vez su subdivisión en dos Subzonas (b1 – b2) sobre la base de la capacidad de recarga del SAG a través de los basaltos. Este conjunto, sumado a aspectos económicos y operativos, condiciona su actual explotación al mismo tiempo que limita el riesgo de contaminación, siendo la naturaleza del acuífero poco conocida en esta zona; y iii) la Zona C, definida como la región con potencial surgencia. En esta área, el acuífero está protegido por los mayores espesores basálticos, por lo que la posibilidad de afectación por las actividades antrópicas de la superficie del terreno es nula, a la vez que presenta las mejores condiciones para uso termal por sus caudales, temperaturas y posibilidad de surgencia. Con esta propuesta se intenta contribuir, desde el ámbito académico, con lineamientos y herramientas que brinden, a las instituciones gestoras y los usuarios del agua subterránea, elementos que sustenten una adecuada gobernanza del acuífero.

Palabras clave: Sistema Acuífero Guaraní, Zonificación, Gestión, Uruguay.

Abstract

A zoning of the Guaraní Aquifer System in Uruguay is proposed based on geological, hydrogeological and resource uses criteria, with the purpose of generating guidelines that can be considered in the management and environmental protection of this resource. Three zones are defined and characterized, namely: i) Zone A, which includes the outcrop area of the physical units that make up the aquifer added to a buffer or security area. It constitutes the area of greatest vulnerability and environmental sensitivity, being also the most important source of groundwater for the supply of the population; Zone B where the aquifer appears at varying depths ranging from a few meters to hundreds of meters and is almost completely protected by basalts. It is proposed to subdivide it into two Subzones (b1 - b2) based on the recharge capacity of the SAG through the basalts. This set, together with the economic and operational aspects influence their current operating conditions while limiting the risk of contamination. The nature of the aquifer is little known in this area; and iii) Zone C, defined as the region with potential artesianism. In this area the aquifer is protected by the greatest basaltic thickness, so the possibility of affectation by anthropic activities on the surface of the land is null, at the same time, it presents the best conditions for thermal use due to its yield, temperatures and possibility of upwelling. The proposal it is intended to contribute, from the academic sphere, with guidelines and tools that provide, to the managing institutions and the users of groundwater, elements that sustain an adequate governance of the aquifer.

Keywords: Guarani Aquifer System, Zoning, Management, Uruguay.

1. INTRODUCCIÓN

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) es un acuífero transfronterizo localizado en la región occidental del continente Sudamericano que se extiende entre los paralelos 16°S y 32°S y los meridianos 47°W y 60°W, y ocupa un área total de 1.087.879,5 km² (Gastmans *et al.*, 2012). Sus recursos hídricos los

comparten una población estimada en más 90 millones en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay (Figura 1) y se estima que se extrae anualmente un volumen algo superior a los 1.000 millones de m³ (PEA, 2009). En Uruguay, el SAG abarca un área de 36.171 km² sobre la que viven aproximadamente 400.000 habitantes y se extrae un volumen

1 Departamento de Geología Sedimentaria y Aplicada, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo – Uruguay. E-mail: gerardo@fcien.edu.uy

2 Centro Regional para la Gestión del Agua Subterránea en América Latina y el Caribe (CeReGAS), Montevideo – Uruguay. E-mail: amanganelli@ceregas.org

aproximado a 25 millones de m³/año (DINAMIGE, 2009). Es aprovechado para diversos usos, entre los que se destacan: el suministro de agua potable a la población establecida sobre el área aflorante (ej.

ciudades de Rivera, Tranqueras); riego y consumo humano (ej. área de afloramientos y la “ventana” de Artigas); y su explotación en los centros turísticos termales sobre el Litoral del Río Uruguay (ej. Salto).

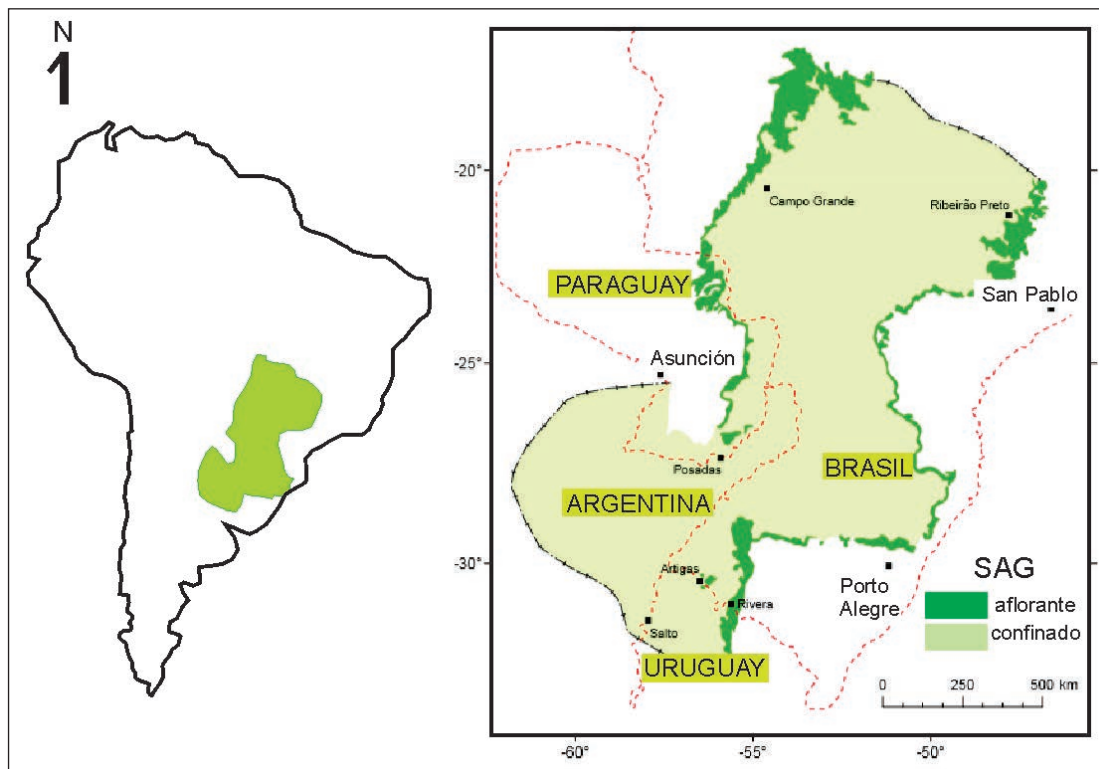


Figura 1. Izquierda: ubicación de las cuencas Paraná y Chacoparanense. Derecha: extensión del SAG señalando las áreas aflorantes y confinadas (modificado de Gastmans *et al.*, 2012).

El Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG) marcó un hito relevante en el conocimiento científico y técnico del SAG. Fue llevado adelante por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, financiado por *Global Environment Facility* (GEF) y ejecutado por la Organización de los Estados Americanos (OEA) con la implementación del Banco Mundial (BM). Además, cabe remarcar que buena parte de las actividades realizadas durante el transcurso del PSAG se beneficiaron por los aportes de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA), del *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources* (BGR) y de la comunidad académica universitaria de los cuatro países. Una parte de los resultados alcanzados por el PSAG en Uruguay son presentados y discutidos en este trabajo.

En 2009, el PSAG presentó el Programa Estratégico de Acción (PEA) con el objetivo final de suministrar un marco de gestión para el manejo sostenible del SAG en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. El PEA definió las líneas de acciones más convenientes y adecuadas a ser ejecutadas en cada país, así como también, aquellas que requieren de la cooperación entre los cuatro países. Ese documento facilitó la comprensión, por parte de diversos actores, de que la gestión sustentable del agua subterránea debe

incluir tanto los niveles regionales y locales, así como los nacionales y transfronterizos.

En abril de 2010, los presidentes de los cuatro países firmaron el “Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní” con el propósito de ampliar los niveles de cooperación y coordinación respecto a un mayor conocimiento científico sobre el Sistema Acuífero y a la gestión responsable de sus recursos hídricos. El proceso de ratificación acaba de concluir en abril de 2018 y su entrada en vigor puede constituir un nuevo impulso que permita a los cuatro países avanzar en promover la conservación y aprovechamiento sustentable del SAG.

Más allá de los avances logrados en la comprensión pública sobre la necesidad de una gestión sustentable, cuando se menciona el “Acuífero Guaraní” se lo asocia con una serie de características naturales que no distinguen la ubicación geográfica y, por lo tanto, sus especificidades. Si bien se reconoce un grado de homogeneidad en el SAG, es obvio que no es posible extrapolar todas sus cualidades regionales a una escala local cuando el objetivo es la gestión del recurso. Por ejemplo, sigue siendo corriente que cuando se habla del SAG en temas de contaminación, explotación, protección ambiental, restricciones en su uso o se lo menciona como una fuente de agua para consumo humano, no siempre se repara en sus

características específicas de la localidad o región considerada.

La propuesta de zonificación del SAG en Uruguay que aquí se ensaya pretende contemplar esas especificidades antes señaladas, con el propósito de contribuir, desde el ámbito académico - técnico, con lineamientos y herramientas que brinden a las instituciones gestoras y usuarios del agua subterránea, elementos para la gobernanza sostenible del Sistema Acuífero. En ese sentido, a partir de la revisión del modelo del funcionamiento del SAG en Uruguay se propone la zonificación del territorio que ocupa en tres zonas: Zona A; Zona B (con las Subzonas b1 y b2); y Zona C. Asimismo, el carácter transfronterizo del SAG fue contemplado en las orientaciones que se brindan para cada una de las tres zonas propuestas.

2. EL SAG REGIONAL

El SAG está constituido por un extenso conjunto de rocas sedimentarias, esencialmente arenosas, silicoclásticas, con buena porosidad y permeabilidad, depositadas durante el Mesozoico. Sus propiedades físicas le confieren características acuíferas que, por su notable extensión y continuidad en el subsuelo, lo hacen un vasto reservorio subterráneo que está presente en las cuencas Paraná y Chaco-Paraná (Figura 1). El SAG se desarrolla a profundidades variables, con un espesor promedio de 250 m con variaciones que oscilan desde los < 50 m a > 600 m, presentando valores de permeabilidad relativamente alta (Kh de 5 - 10 m/d) y una transmisividad media estimada en 300 m²/d (Foster *et al.*, 2009).

El SAG constituye un sistema hidrogeológico que, con excepción del área de afloramientos donde conforma un acuífero libre, se encuentra confinado y protegido naturalmente por rocas basálticas que constituyen una barrera natural prácticamente impermeable (Rocha, 1996). En buena medida, esa situación resulta responsable de que no se hayan identificado problemas de contaminación o explotación excesiva en el mismo, salvo algunas situaciones puntuales (PEA, 2009). A su vez, la cobertura basáltica también condiciona su explotación, incidiendo en los costos operativos de perforación, estableciendo limitaciones operativas y del equipamiento disponible donde presenta espesores importantes, así como otras veces ocasiona incertidumbres en cuanto al éxito del alumbramiento de agua.

Los límites físicos del SAG fueron definidos sobre la base de la distribución espacial de las unidades geológicas que lo componen (Lebac, 2008; Gastmans *et al.*, 2012). Las rocas sedimentarias que constituyen la base del SAG se apoyan sobre una superficie de discordancia regional labrada sobre un mosaico de unidades geológicas de diferente naturaleza y edad. A su vez, el techo del SAG está definido por los basaltos eocretácicos que ocupan un área de 1.000.000 km². Bajo esa definición, tanto

los basaltos suprayacentes al SAG (Pos-SAG) como las rocas sedimentarias paleozoicas infrayacentes (Pre-SAG) son excluidas como parte integrante de ese sistema hidrogeológico. Sin embargo, en varios sectores se reconocen las posibles relaciones de flujo de las aguas del SAG y los acuíferos del Pre-SAG (Lebac, 2018; Hirata *et al.*, 2009; Gastmans *et al.*, 2012), los que a su vez inciden en el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del mismo.

Los resultados alcanzados durante el PSAG permitieron demostrar que el SAG exhibe continuidad física entre los cuatro países que lo componen, por lo que constituye un acuífero transfronterizo. El flujo regional de las aguas subterráneas del SAG exhibe un *trend* de Norte hacia el Sur, que acompaña aproximadamente el eje de la Cuenca de Paraná. Según Araujo *et al.* (1995, 1999), Machado (2005) y Gastmans *et al.* (2012) ese patrón de flujo está influenciado por los principales rasgos tectónicos y estructurales de la cuenca, los que a su vez permiten la delimitación de grandes dominios hidrogeológicos (Foster *et al.*, 2009; Lebac, 2008). En lo que respecta a los tiempos de circulación de las aguas en el SAG, los estudios realizados mostraron que son elevados (flujo lento) y, en sectores de mayor confinamiento, extremadamente elevados llegándose a postular la situación de no flujo en varios sectores (Hirata *et al.*, 2009; Lebac, 2008).

La caracterización hidroquímica regional del SAG muestra que sus aguas son de buena calidad, generalmente potables, de muy baja mineralización y renovables, aunque se han detectado en algunos sectores específicos anomalías de flúor, arsénico, cadmio, zinc, entre otros elementos, así como presenta amplios rangos de salinidad (Lebac, 2008). Esas variaciones y heterogeneidades naturales de las aguas están relacionadas al prolongado tránsito a través de sus extensas capas sedimentarias, otras a la profundidad por la que transitan y a la incidencia de aguas subterráneas más profundas en comunicación hidráulica con el sistema (Lebac, 2008; Manzano y Guimaraens, 2008). Las causas de varias de las anomalías geoquímicas que se detectan permanecen en buena medida desconocidas, aunque existen contribuciones que intentan explicar el origen anómalo de algunos elementos (Manzano y Guimaraens, 2008; Gastmans *et al.*, 2010, 2012).

Por último, en relación a los efectos transfronterizos del uso del SAG, los estudios realizados en los Proyectos Piloto identificaron en áreas de frontera que los mismos estarían restringidos a una franja del territorio que, en general, alcanza a pocas decenas de kilómetros, dependiendo de las características hidrodinámicas locales específicas (PEA, 2009). Se toma como ejemplo aquí, el cono de depresión generado por la extracción de agua en la región de Santana do Livramento y Rivera que, aunque de pequeña magnitud, cruza las fronteras entre Brasil y Uruguay afectando la dirección de flujos locales de aguas subterráneas del SAG.

3. EL SAG EN URUGUAY

Se describen y analizan aquí los principales aspectos geológicos, hidrogeológicos, de uso y normativos del SAG en el territorio uruguayo, los que son considerados, en buena medida, como sustento de la propuesta para su zonificación.

3.1. Geología

La geometría y extensión del SAG están definidas por la distribución espacial y deformación de las

unidades litoestratigráficas mesozoicas que, en continuidad física, o aparente continuidad, se distribuyen por encima de la discordancia permotriásica y por debajo de los basaltos cretácicos (Lebac, 2008). En la figura 2 se muestra la extensión del SAG en la Cuenca Norte, denominación local que adquiere en territorio uruguayo, la región más austral de la Cuenca Paraná. A continuación, se describen sucintamente las principales características litoestratigráficas y estructurales de la Cuenca Norte que revisten significación en el funcionamiento hidrodinámico e hidroquímico del SAG.

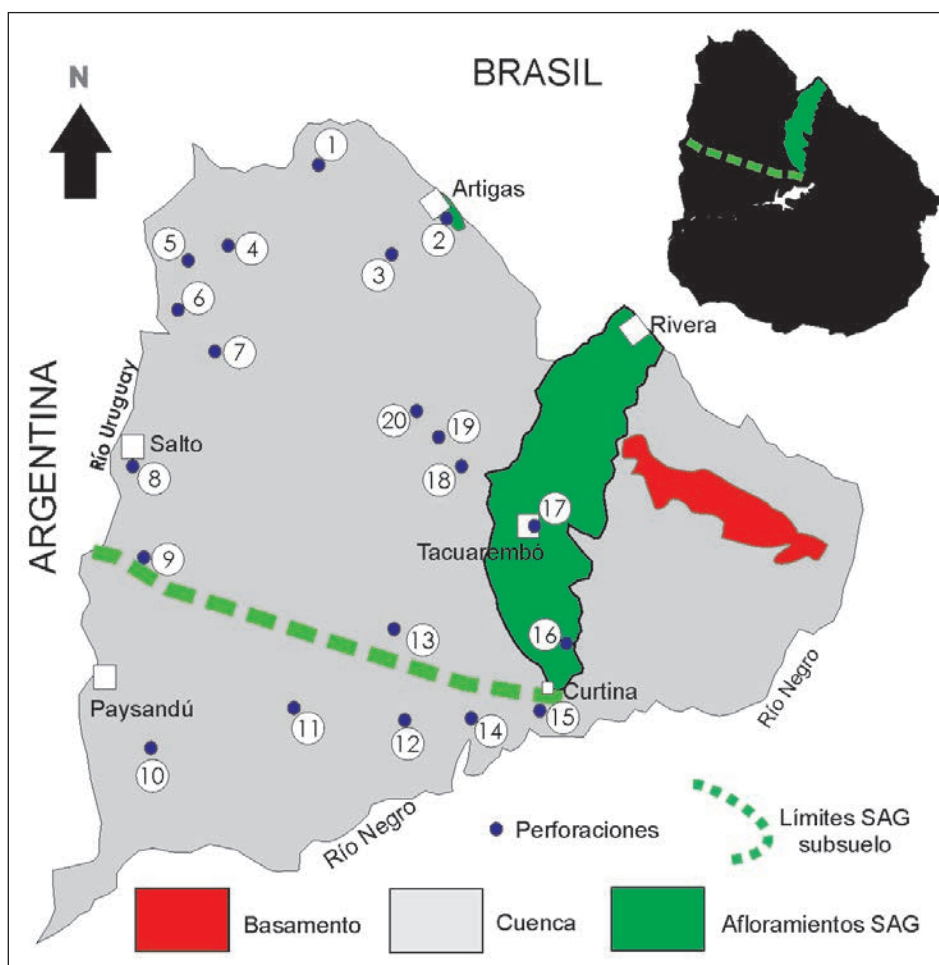


Figura 2. Extensión del SAG en la Cuenca Norte (modificado de Techera *et al.* 2017). Ubicación de los pozos mencionados en el trabajo: 1 – Yacaré, 2 – Artigas, 3 Pelado, 4 - Itacumbú, 5 – Gaspar, 6 – Belén, 7 Arapey, 8 - Salto, 9 – Quebracho, 10 – Paso Ullestie, 11 -Guichón, 12 – Salsipuedes, 13 – Cerro Padilla, 14 - Cardozo Chico, 15 – Achar, 16 – Los Cuadrados, 17 – Tacuarembó, 18 – Cañada del Charrúa, 19 -Pepe Núñez, 20 – Quintana (Fuente: de Santa Ana *et al.*, 2006; Soto, 2014; Marmisolle, 2015 y otros).

3.1.1. Unidades litoestratigráficas del SAG

Las unidades litoestratigráficas de la Cuenca Norte que componen el SAG, de techo a base, son las formaciones Rivera, Tacuarembó e Itacumbú. Las mismas se describen a continuación:

Formación Rivera (Cretácico Inferior)

Fue definida por Ferrando *et al.* (1987) con el propósito de reunir a las areniscas marrones a rojizas con estratificación cruzada (Figura 3) que integraban el Miembro Superior de la Formación Tacuarembó de Bossi *et al.* (1975). Está caracterizada por areniscas

finas a medias, marrones a rojizas, con buena a moderada selección, fundamentalmente cuarzosas a cuarzo – feldespáticas, con líticos asociados, con estratificación cruzada de gran porte y de alto ángulo como estructura sedimentaria principal. Se interpretan como campos de dunas depositados bajo condiciones climáticas cálidas y áridas (Ferrando *et al.*, 1987; Perea *et al.*, 2009; Bochi do Amarante, 2017).

Las relaciones estratigráficas de la Formación Rivera son en la base siempre con la Formación Tacuarembó, contacto que se expresa en una superficie erosiva suavemente ondulada y, otras veces, por contactos netos horizontales a subhorizontales. Hacia el

techo, las areniscas de la Formación Rivera pasan a la Formación Arapey con la aparición del primer derrame basáltico; mientras que, en el área de afloramientos, la Formación Rivera puede aparecer cubierta por sedimentos cuaternarios.

El espesor promedio de la unidad es 30-40 m, con algunas variaciones extremas que pueden deberse a las dificultades de definir el contacto con la Formación Tacuarembó, aspecto que ha sido estudiado en muestras de pozos por Aguirre *et al.* (2008). Los espesores de la unidad se muestran en la Tabla 1. Por sus relaciones estratigráficas con las unidades infra y suprayacentes se asume para la Formación Rivera una edad Cretácico Inferior.



Figura 3. Vista general de las areniscas marrones a rojizas con estratificación cruzada de alto ángulo que integran la Formación Rivera. A la izquierda, ruta 5, 16 km al Norte de Tacuarembó, a la derecha, ruta 30 en la Bajada de Pena.

Formación Tacuarembó

(Jurásico Superior-Cretácico)

Litoestratigráficamente, corresponde a los términos litológicos que reúne el Miembro Inferior de la Formación Tacuarembó de Bossi *et al.* (1975) y Preciozzi *et al.* (1985). Reúne estratos de arenitas finas, a veces muy finas a finas, cuarzosas a cuarzo-feldespáticas, blanquecinas, de buena selección y escasa matriz (menos de 2%), mostrando una gran homogeneidad granulométrica y composicional. Ocasionalmente, se suceden intercalaciones de bancos de areniscas masivas muy finas a medias y pelitas, con tonalidades variadas, predominando las blanquecinas, rojizas y verdosas.

La estratificación horizontal paralela, a subhorizontal paralela, es la estructura dominante en la Formación Tacuarembó (Figura 4). Sin embargo, es común observar estratificaciones cruzadas, de tipo tabular – planar, tangencial y en artesa y, ocasionalmente, niveles de areniscas masivas intercalados a los estratos más conspicuos de areniscas. Las areniscas finas blanquecinas aparecen en estratos de marcada continuidad y tabularidad, cortados por geometrías

de canal donde se observan intraclastos y/o arenas más gruesas.

La Formación Tacuarembó es interpretada como una sucesión de depósitos fluviales y eólicos, conformando extensas planicies arenosas rasas asociadas a canales efímeros y/o permanentes (Bochi de Amarante, 2017). Estas planicies fluviales aparecen interdigitadas a depósitos eólicos, fundamentalmente sábanas de arena (*sand sheet*) y subordinadamente dunas e interdunas húmedas (Perea *et al.*, 2009).

Su múltiple contenido fosilífero (peces, moluscos, tortugas, cocodrilos, ostrácodos, coprolitos, conchostráceos, restos de tiburones dulceacuícolas y de dinosaurios), permite asignar a la Formación una edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior, así como también definir condiciones paleoambientales de humedad y disponibilidad de agua en el sistema (Perea *et al.*, 2009; Soto *et al.*, 2012; Mesa y Perea, 2015) distintas a las de la suprayacente Formación Rivera (clima árido).

Las relaciones estratigráficas de la Formación Tacuarembó en su base son de discordancia con

las formaciones Buena Vista y Yaguari (Pérmico Superior) y concordante con la Formación Itacumbú. Hacia el techo, la unidad muestra relaciones de discontinuidad estratigráfica con las areniscas de la Formación Rivera. La Formación Tacuarembó infrayace a los basaltos de la Formación Arapey en buena parte de la faja de afloramientos, particularmente, en la región centro sur, así como

esas relaciones estratigráficas son constatadas en pozos del noroeste de la cuenca.

El espesor medio de la Formación Tacuarembó es de 200 - 250 m, mostrando en amplios sectores una continuidad lateral con espesores casi constantes, sólo produciéndose un adelgazamiento de los espesores por erosión hacia la región aflorante y/o acuífamientos sobre algunos altos estructurales.



Figura 4. A la izquierda, vista general de la Formación Tacuarembó, areniscas finas y blancas con estratificación horizontal (ruta 26 al Este de Tacuarembó) y con estratificación cruzada en artesa asociadas a geometrías de canal (ruta 26 al Oeste de Tacuarembó).

Formación Itacumbú (Jurásico)

Su nombre deriva del pozo Itacumbú (NO10-I x-1), situado en la Cuchilla de Itacumbú, al Oeste del departamento de Artigas donde alcanza una potencia de 220m (profundidad 780-1000m). Su distribución en subsuelo se muestra en los pozos de la Tabla 1. Fue definida por de Santa Ana y Veroslavsky (2003) para agrupar a una sucesión de estratos de arenitas finas a muy finas, subfeldespáticas a feldespáticas, con abundante biotita y muscovita, blanquecinas a grisáceas, naranjas y marrones, algo silicificadas, a las que se intercalan estratos pelíticos y, ocasionales niveles arcillosos, margosos y carbonáticos.

Estas litologías fueron descritas en detalle por Aguirre *et al.* (2008) y cabe señalar que esta sucesión fue originalmente descrita y separada sobre la base de su comportamiento electrofaciológico (Figura 5) por González y de Santa Ana (1998) y asignada, genéricamente, al Triásico - Jurásico.

La Formación Itacumbú se apoya sobre los basaltos de la Formación Gaspar (pozo Gaspar) y en discordancia sobre la Formación Buena Vista en el resto de los pozos profundos del sector noroeste de la cuenca, mostrándose concordante con la suprayacente Formación Tacuarembó.

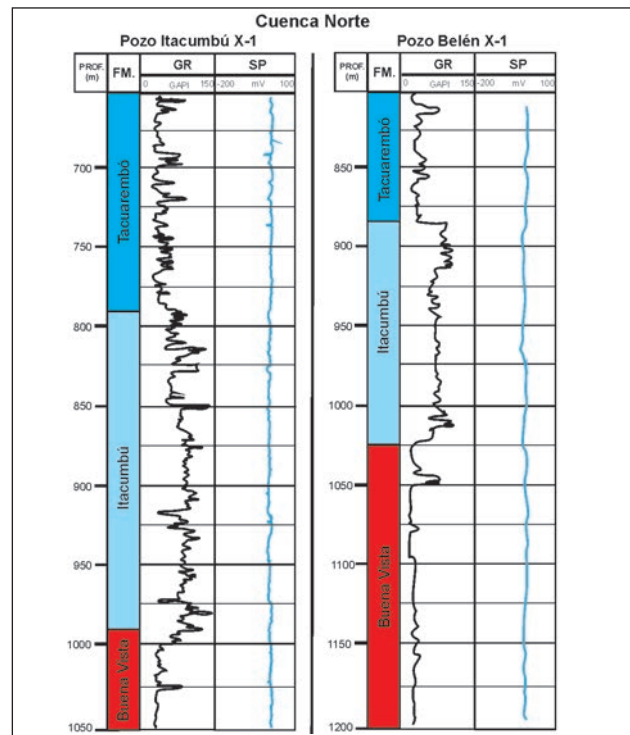


Figura 5. Diagramas de los pozos Itacumbú X-1 (650 a 1150 m) y Belén X-1 (750 a 1200m) de la Cuenca Norte (ver ubicación figura 2) que muestra el contraste en el comportamiento de las areniscas finas y pelitas de la Formación Itacumbú con respecto a las supra e infrayacentes formaciones Tacuarembó y Buena Vista en los registros de GR y SP (modificado de Ucha y de Santa Ana, 1990).

3.1.2 Configuración estructural

Los principales rasgos estructurales del subsuelo se reconocen a partir de la información gravimétrica, sísmica y magnetoteléfrica, así como de un conjunto de perforaciones profundas que se dispone la Cuenca Norte (Ucha y de Santa Ana, 1990; de Santa Ana *et al.*, 2006; Oleaga, 2002; Rodríguez *et*

al., 2015; Marmisolle, 2015). En particular, el sector infrabasáltico noroeste exhibe como principales rasgos estructurales un conjunto de fuertes lineamientos y fallas que, con orientación general NW, los cuales controlan la configuración de altos y bajos, estructuración que a su vez es afectada, en sectores, por fallas NNW, NE y, subordinadamente NS (Figura 6).

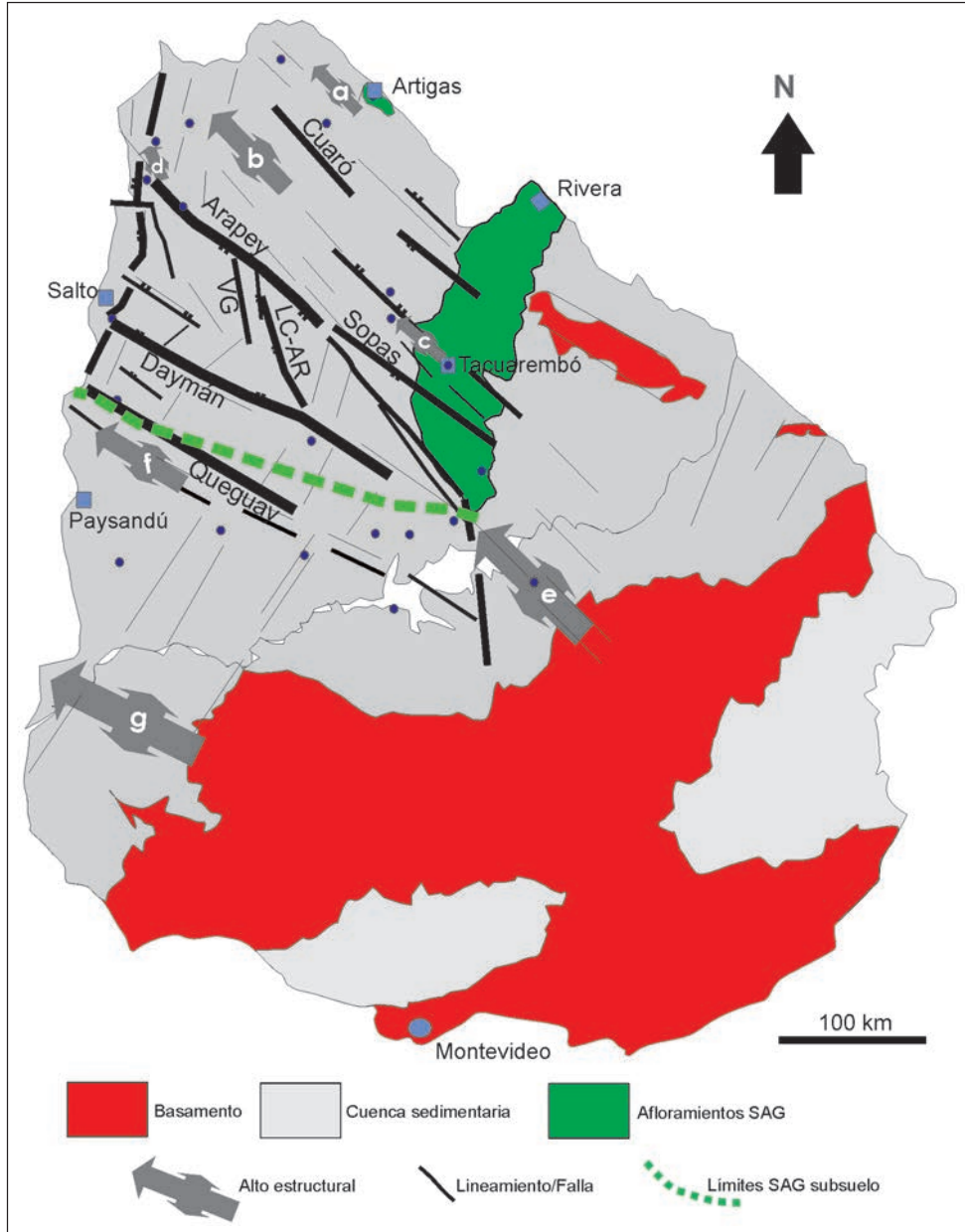


Figura 6. Principales elementos estructurales de la Cuenca Norte. Altos de: a) Cuareim, b) Paguero - Cuaró, c) Tacuarembó, d) Gaspar, f) Queguay, g) Mercedes. VG = Lineamientos Daymán, Arapey-Sopas, Valentín Grande; LC-AR= Fallas Arroyo Las Cañas – Arerunguá.

Asociados a los *trends* estructurales NW se desarrollan varios de altos estructurales que controlan la configuración de algunos depocentros vulcano-sedimentarios profundos. Los lineamientos NW, en la mayoría de los casos, controlan el curso de los principales ríos que desembocan en el río

Uruguay (Daymán, Arapey, Queguay). La figura 7 presenta diferentes cortes geológicos que permiten visualizar la configuración general del subsuelo de la Cuenca Norte, así como la distribución y geometría del SAG y sus relaciones con las unidades infra y suprayacentes.

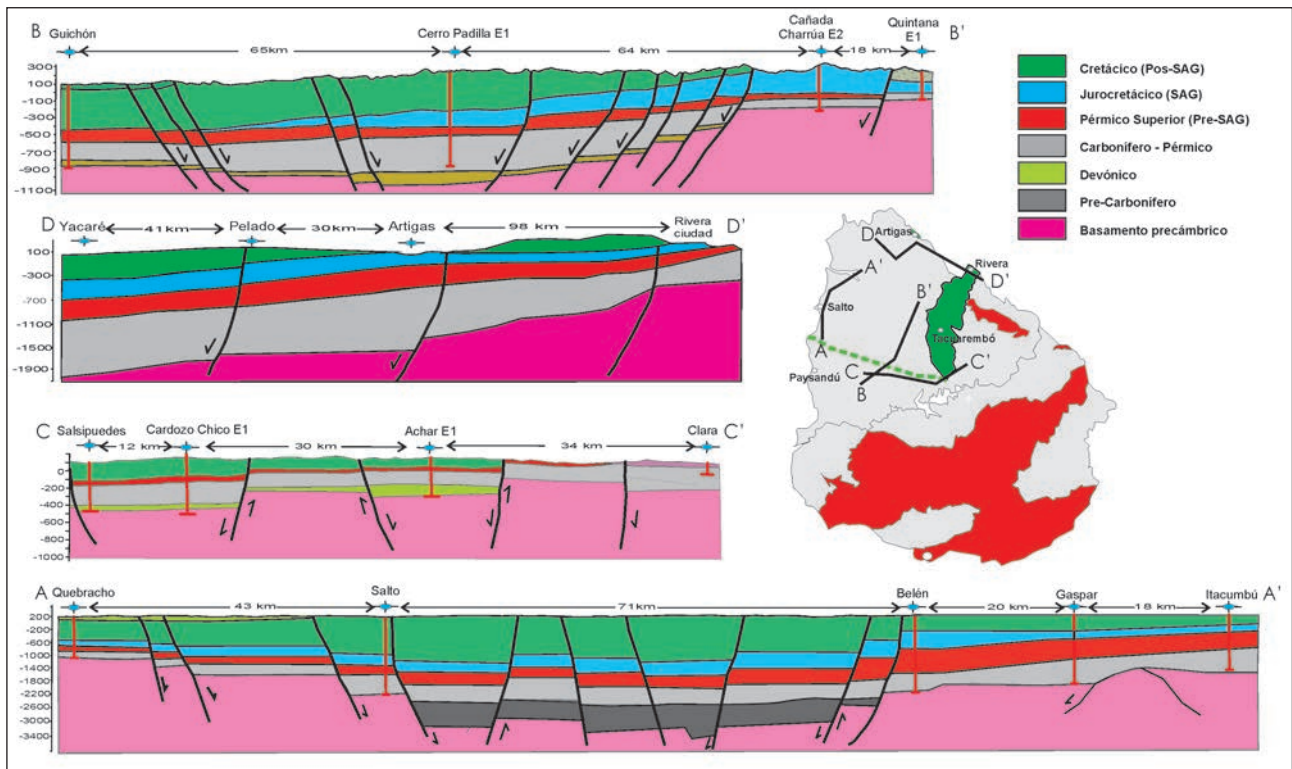


Figura 7. Cuatro cortes geológicos que muestran la configuración del SAG en el Cuenca Norte y brindan sustento a la propuesta de zonación del SAG (Fuente: Marmisolle, 2015; Ucha y de Santa Ana, 1990; de Santa Ana *et al.*, 2006).

Un rasgo estructural sobresaliente de la cuenca, que tiene una particular incidencia en el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del SAG, es el corredor estructural NW, descrito y caracterizado por Marmisolle (2015), que se desarrolla en la región centro-oeste y queda definido por los fallamientos Daymán y Arapey-Sopas. Este corredor muestra una profundización progresiva hacia el W-NW a través de un conjunto de fallas lítricas normales que se desarrollan en su interior, delimitando algunos bloques que poseen características diferentes. En particular, en el extremo Oeste del corredor, se ubica un bloque delimitado al Norte y Sur por las fallas Arapey y Daymán respectivamente, mientras que hacia el Este lo limita un *trend* de fallas NNE asociados a los Lineamientos Las Cañas – Arerunguá. Este bloque muestra en su sector occidental profundidades de basamento en torno a 3 500 m, fuertes anomalías gravimétricas positivas asociadas al basamento (Rodríguez *et al.*, 2015), la preservación de relictos sedimentarios pre-carboníferos (Marmisolle *et al.*, 2016), los mayores espesores de basaltos conocidos en la cuenca (más de 1000 m) con características petrológicas algo diferentes a los derrames del Norte (Bossi y Schipilov, 2007) así como un basculamiento hacia el Oeste (Bossi y Heide, 1970; Marmisolle, 2015).

En particular, se entiende que la falla Arapey constituye un rasgo de significación en la evolución tectónica y sedimentaria durante el Paleozoico y

Mesozoico de la cuenca, constituyendo así mismo un límite entre basamentos precámbricos de diferente naturaleza (Rodríguez *et al.*, 2015). La falla Arapey controló el emplazamiento del magmatismo cretácico, facilitando la salida y acumulación de mayores volúmenes de basaltos con fallamientos subverticales con rechazos de cientos de metros que afectaron la continuidad física del SAG en ese sector.

3.2. Hidrogeología

Los principales antecedentes del SAG en Uruguay refieren a las contribuciones de Montañó *et al.* (1998), Oleaga (2002), Montañó (2003), Collazo (2006), Gómez (2007) y Heinzen *et al.* (2003). El PSAG propició la realización de una exhaustiva recopilación de antecedentes y generó un volumen muy importante de datos e información que permitió avanzar significativamente en el conocimiento de la naturaleza del SAG y ajustar elementos que explican su comportamiento hidrodinámico e hidroquímico (Lebac, 2008; Manzano y Guimaraens, 2008; Gastmans *et al.*, 2012). Un nuevo mapa del SAG fue presentado por Techera *et al.* (2017) incluyendo información geológica e hidrogeológica más reciente. A partir de esas contribuciones y nuevos datos geológicos e hidrogeológicos se presenta aquí una actualización y revisión del modelo hidrogeológico conceptual del SAG.

Los límites del SAG en Uruguay fueron establecidos por Lebac (2008) y ajustados por Techera *et al.* (2017).

En superficie, el SAG está representado por las formaciones Tacuarembó y Rivera, las que conforman una larga y estrecha faja de 160 km por aproximadamente 30-35 km que, con dirección Norte – Sur, ocupa la región central de la Cuenca Norte (Figura 2). Otros pequeños afloramientos del SAG se encuentran en las denominadas “ventanas”, relacionadas con controles estructurales se desarrollan en la región basáltica de la cuenca. Las litologías de la Formación Itacumbú integran al SAG (Lebac, 2008; Techera *et al.*, 2017) siendo su desarrollo exclusivamente en subsuelo y restringido a la porción Oeste de la región infrabasáltica de la cuenca.

El límite Este del SAG lo define la base de la Formación Tacuarembó, la que se apoya en discordancia sobre las formaciones paleozoicas Buena Vista y Yaguarí. El límite Sur está dado por los afloramientos de los alrededores de la localidad de Curtina. Al Suroeste

y Oeste, el SAG está cubierto por los basaltos por lo que su desarrollo está controlado por los pozos, la información geofísica de subsuelo y los controles que ejercen algunos elementos estructurales de la cuenca.

Hacia el Sur, se asume que el SAG no se extiende más allá del Alto de Queguay tal como fue propuesto por Heinzen *et al.* (2003), Lebac (2008) y Techera *et al.* (2017). Los pozos Achar E-1, Cardozo Chico E-1, Salsipuedes, Guichón, Rincón del Bonete y Paso Ullestie (Figura 2, Tabla 1) muestran que las unidades componentes del SAG no están presentes en ese sector del subsuelo de la cuenca, verificándose además que en esos pozos los basaltos cretácicos se apoyan directamente sobre unidades paleozoicas. La presencia del SAG se verifica en los pozos Quebracho, Cerro Padilla E-1 y Los Cuadrados E-1 (Figura 2).

Hacia el Norte y Noroeste, el SAG también está cubierto por los basaltos y se extiende más allá de los límites geográficos de Uruguay por los territorios de Brasil y Argentina.

Tabla 1. Principales pozos de la Cuenca Norte que muestran la distribución y espesores de las unidades que componen el SAG, así como otros adyacentes que controlan su desaparición en el subsuelo.

Quando no fue posible o no se tiene información confiable se ha preferido incluir el espesor total del par Tacuarembó – Rivera en una sola columna

(Fuente: de Santa Ana y Veroslavsky, 2003; Lebac, 2008; Soto, 2014; Frikely S.A., 2015).

unidad pozo	UTM x	UTM y	Formación Itacumbú	Formación Tacuarembó	Formación Rivera	Formación Arapey
Gaspar (NOG - x-1)	436398	6611369	248	287	35	513
Belén (NO9B x-1)	433265	6588952	135	355	52	460
Itacumbú (NO10I x-1)	454197	6621212	215	325	34	421
Yacaré(NO8Y x-1)	502511	6655661	170	304	0	421
Pelado (NO7P x-1)	525849	6619549	86	414	36	234
Artigas (NO2A x-1)	552179	6633320	50	190		0
Salto (NO3S x-1)	413690	6519193	90	195		955
Arapey (IGP)	450522	6575901	-	269		543
Quintana E-2	555826	6531310	-	250	0	79
Cañada del Charrúa E-1	563347	6514893	-	212		38
Pepe Núñez E-1	557993	6519777	-	250		0
Cerro Padilla E-1	522758	6463772	-	170	0	434
Quebracho (NO4Q x-1)	416093	6476790	-	160	55	575
Cardozo Chico E-1	562909	6408768	-	-	-	213
Achar E-1	592650	6413051	-	-	-	100
Salsipuedes (NO6S x-1)	551158	6406921	0	-	-	210
Guichón (NO5G x-1)	474751	6419876	0	-	-	545
Los Cuadrados E-1	597471	6441130	-	190	-	-
Paso Ullestie (IGP)	422854	6394486	0	-	-	360
Centenario (exploratorio)	547439	6368828	-	0	0	149
Rincón del Bonete (IGP)	553046	6368157	0	-	-	160

La recarga del SAG ocurre por infiltración directa del agua de lluvia y del escurrimiento superficial a lo largo de la faja de afloramiento de las formaciones Rivera y Tacuarembó (Figura 2). Se da también por infiltración vertical en la estrecha faja occidental contigua a los afloramientos del SAG, donde los basaltos de la Formación Arapey exhiben espesores poco potentes. Cabe señalar que para las áreas aflorantes, el modelo de flujo subterráneo desarrollado por el PSAG mostró una importante interacción entre el acuífero y los ríos. Manzano y Guimaraens (2012) señalan que buena parte del agua que se recarga en las áreas de afloramiento se mueve en celdas de flujo locales, descargando a valles fluviales encajados, manantiales y pozos cercanos a la recarga, lo que coincide con una recarga efectiva reducida del orden 10-15 mm/año (Vives *et al.*, 2008).

Otras áreas de recarga local del SAG están asociadas a las ventanas que ocurren en la Cuenca Norte siendo las más destacadas: ciudad de Artigas y área adyacente, Rincón de Pacheco, Paguero y Pepe Núñez. En forma indirecta, la recarga local también ocurre por infiltración vertical a lo largo de zonas de fallas (abiertas) que afectan a los basaltos, y áreas donde la piezometría favorece los flujos descendentes (Manzano y Guimaraens, 2012).

Se adopta aquí que la recarga efectiva del SAG es mínima a nula cuando los espesores de los basaltos superan los 100 m con base en las propuestas de zonificación del SAG de Hirata *et al.* (2009), Foster *et al.* (2009) y Sindico *et al.* (2018). Sin embargo, vale la pena mencionar que con posterioridad al PSAG, otros estudios mostraron que la recarga es nula o mínima con espesores aún menores, indicando además que en torno a los 60 m de profundidad la circulación del agua pasa a ser preferencial en las zonas de fracturas horizontales del acuífero fisurado (Fernandes *et al.*, 2011; Wahnfried *et al.*, 2010). La presencia de niveles vacuolares en el perfil de un derrame basáltico dificulta aún más la infiltración vertical profunda (Fernandes *et al.*, 2012) por lo que, si se tiene en cuenta que las potencias promedio de las coladas en la cuenca se estiman entre 25 a 35 m, la presencia de dos o más derrames superpuestos inhibiría casi totalmente la recarga vertical efectiva del SAG.

La dirección y sentido del flujo del SAG está definida por la piezometría de pozos cuya distribución en la cuenca es muy heterogénea. Existe una gran densidad en las áreas aflorantes y un pequeño grupo de pozos profundos concentrados a lo largo del Corredor Termal del Río Uruguay. A su vez, cabe señalar que para la zona aflorante se ha definido más de un nivel hidráulico dentro del SAG (Gómez, 2007) lo que, sumado a la acción de bombeo, puede dificultar la interpretación de las direcciones de flujo regionales. Por otro lado, los niveles piezométricos de los pozos profundos del corredor termal pueden verse influenciados por la captación de agua de

las unidades del Pre-SAG. Cabe señalar que, en la Cuenca Norte, las unidades pérmicas del Pre-SAG que están en contacto con el SAG son las formaciones Buena Vista (areniscas finas a medias, blanquecinas a rojizas) y Yaguarí (pelitas y areniscas finas, de tonalidades variadas).

Existe una amplia región central de la Cuenca Norte donde la naturaleza del SAG se conoce apenas a través de algunos pozos estratigráficos y escasa información geofísica, y la ausencia de pozos para la captación de agua hace que el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico del SAG sea muy poco conocido y sujeto a interpretaciones especulativas.

Uno de los aspectos a remarcar aquí es la comprobación de la estrecha relación que existe entre algunos de los principales rasgos estructurales de la Cuenca Norte con el funcionamiento hidrogeológico del SAG. En particular, se hará referencia al Lineamiento Arapey - Sopas, el que constituye un elemento de primer orden para el entendimiento de la hidrodinámica e hidroquímica del SAG (Oleaga, 2002; Manzano y Guimaraens, 2008).

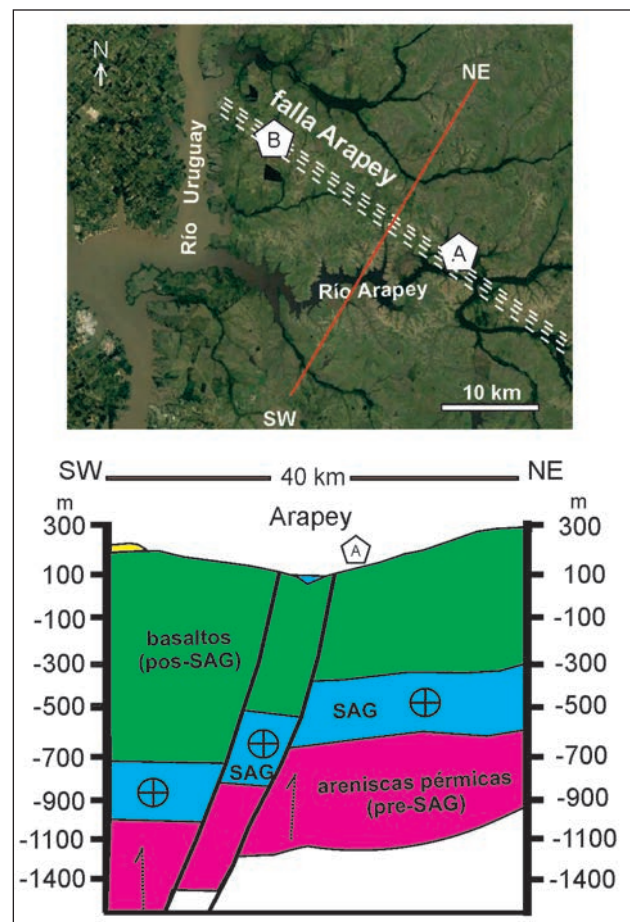


Figura 8. Esquema que muestra la compartimentación del SAG por la Falla Arapey. El rechazo es estima en 300 - 400 m, mostrando que hacia el Sur los basaltos rápidamente superan los 1000 m mientras que hacia el Norte alcanzan los 500m (modificado de Ucha y de Santa Ana, 1990; Marmisolle *et al.*, 2016).

El Lineamiento Arapey – Sopas, en particular en su sector occidental, es considerado una barrera más o menos efectiva para el tránsito de las aguas subterráneas del SAG de Norte hacia el Sur. Esta estructura pone en contacto por falla a las areniscas del SAG situadas al Sur con las areniscas de Buena Vista al Norte (Figura 8) estableciendo una conexión hidráulica lateral entre ambas unidades. La compartimentación del SAG, al menos a lo largo de la Falla Arapey, es consistente con el patrón de las líneas de flujo propuesto para la ciudad de Salto y alrededores por Gamazo *et al.* (2016) (Figura 9) siguiendo entonces la pendiente regional de la cuenca hacia el W-NW.

En la figura 10, se presenta el modelo conceptual de flujo del SAG modificando parcialmente de Heinzen *et al.* (2003), Oleaga (2002) y Techera *et al.* (2017)). En este trabajo se mantienen las direcciones de flujo al Norte del Lineamiento Arapey - Sopas, así como las dos tendencias que se registran en el área aflorante del SAG: a) en la zona de Rivera hacia el Noroeste, y al Sur de esta hacia el Suroeste y b) Al sur del Lineamiento Arapey la dirección de flujo es hacia el Noroeste como fuera señalado anteriormente. Por último, en relación a la ausencia de pozos

de agua en la región central, se ha preferido aquí eliminar un conjunto de curvas piezométricas dada la incertidumbre que las mismas generan sobre el comportamiento del SAG.

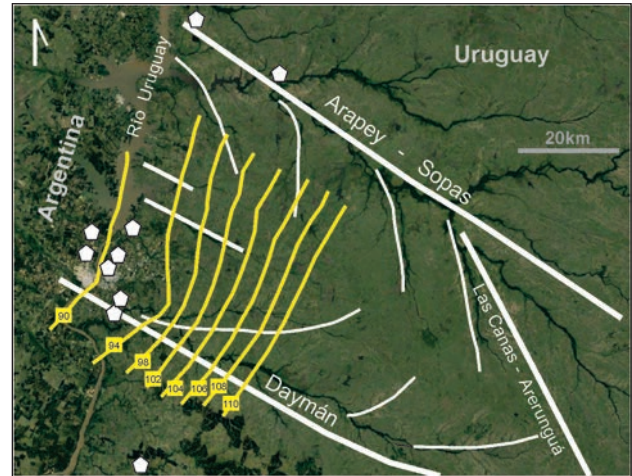


Figura 9. Piezometría en la región de la ciudad de Salto y alrededores realizada por Gamazo *et al.* (2016) tomando en cuenta el funcionamiento de un pozo Daymán (Salto - NO3S x-1).

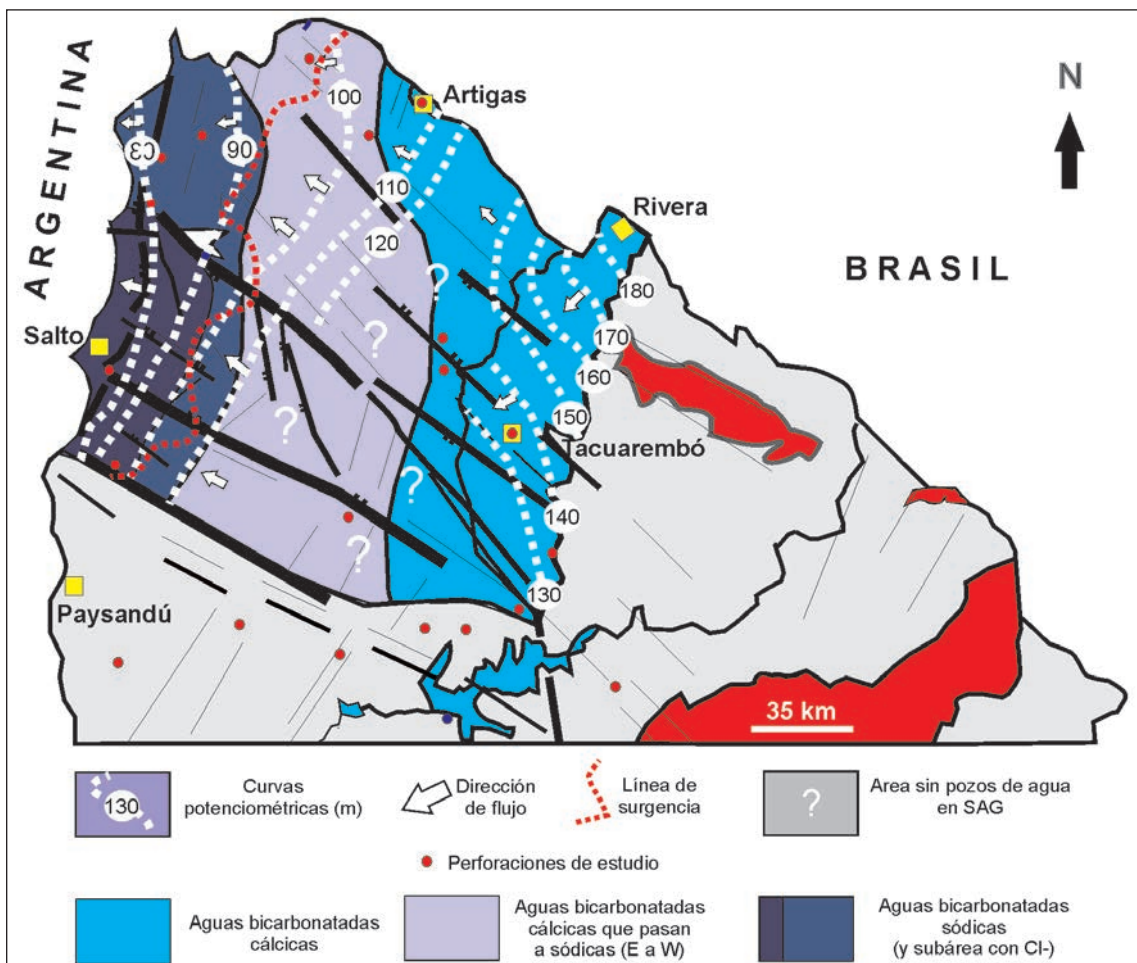


Figura 10. Modelo hidrogeológico conceptual del SAG en Uruguay para explicar el movimiento de las aguas subterráneas y el comportamiento hidroquímico (modificado de Montañó *et al.*, 1998; Lebac, 2008; Techera *et al.*, 2017; Gamazo *et al.*, 2016; Manzano y Guimaraens, 2008; Gastmans *et al.*, 2012). La línea de surgencia fue elaborada a partir de Lebac (2008) y Morales (2015).

No se hace aquí particular referencia a la descarga del sistema acuífero, la que es tratada en varios documentos del PSAG, reconociéndose una descarga regional del SAG hacia el W-NW.

A lo largo de ambos márgenes del río Uruguay se reconoce, asociada a la zona confinada, un área de surgencia que ocupa una extensa faja (figura 10). En esta, los pozos perforados que alcanzan el SAG presentan surgencia natural con presiones de carga que llegan a los 4.0 kg/cm² y caudales de surgencia que llegan a 230 m³/h (Techera *et al.*, 2017). Ambos parámetros pueden presentar valores altamente variables entre pozos. Por otra parte, y producto de la profundidad a la que se desarrolla el SAG, la temperatura del agua, en las diferentes perforaciones, varía en un rango de 39°C a 48°C (PEA, 2009).

La evolución geoquímica de las aguas del SAG está primaria y directamente vinculada con el patrón de flujo, incidiendo además la configuración estructural, los tiempos de tránsito y la interacción que ejercen las rocas infra y suprayacentes al SAG (Lebac, 2008). Los estudios hidroquímicos realizados durante el PSAG mostraron que el modelo conceptual regional, desarrollado durante el proyecto, es válido para casi todo el acuífero, con algunas excepciones (Manzano y Guimaraens, 2012).

En Uruguay, se conoce que las aguas del SAG en el área aflorante y zonas de ventanas son del tipo bicarbonatadas cálcicas y, subordinadamente, bicarbonatadas cálcico-magnésicas, con poca mineralización, lo que se refleja en las bajas conductividades eléctricas observadas (Lebac, 2008). Asimismo, los pozos ubicados sobre ambas márgenes del río Uruguay, o muy próximo a ésta y donde el SAG presenta un alto confinamiento, muestran aguas del tipo bicarbonatadas sódicas, con mayor grado de mineralización y conductividades eléctricas más elevadas.

Los pozos que se encuentran al Sur del Lineamiento Arapey muestran que las aguas bicarbonatadas sódicas presentan además el anión cloruro en su composición, así como exhiben otras anomalías con relación al contenido de algunos metales como As, Zn y Cd (Gastmans *et al.*, 2010). Manzano y Guimaraens (2008) atribuyen estas anomalías a una mezcla de las aguas de SAG con las ascendentes provenientes de los acuíferos paleozoicos infrayacentes, interpretación que también fue sugerida por Montañó *et al.* (1998), Decoud y Rocha (2000) y Carrión y Massa (2011).

Por último, en relación al comportamiento hidroquímico del SAG en la región central de la cuenca, se asume que sigue el patrón establecido en el modelo hidroquímico conceptual (PSAG, 2009), es decir que, de Este a Oeste, las aguas pasan progresivamente de aguas bicarbonatadas cálcicas a esencialmente sódicas (Figura 11).

Procesos relacionados con el intercambio iónico del sodio por el calcio, y posiblemente magnesio, son responsables por las modificaciones sufridas por las aguas bicarbonatadas cálcicas a sódicas a lo largo de su tránsito por el acuífero (Manzano y Guimaraens, 2008).

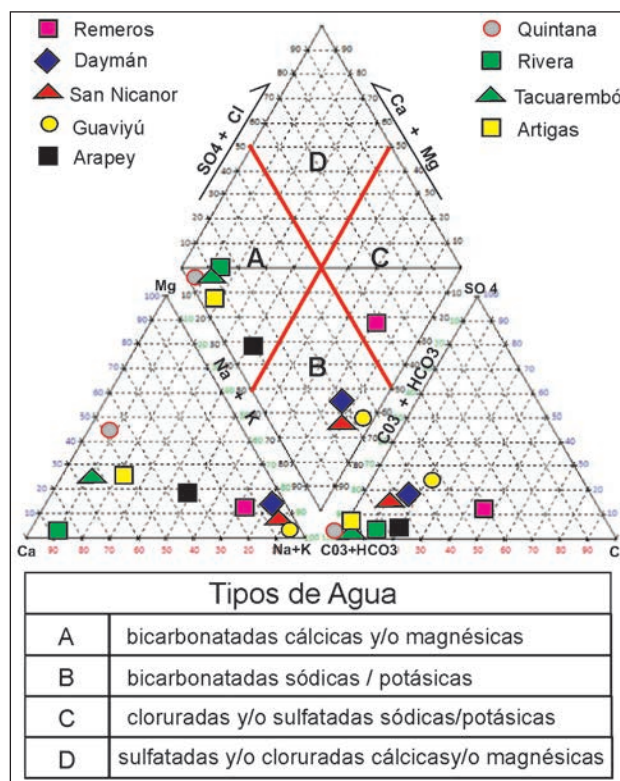


Figura 11. Diagrama de Piper mostrando la caracterización de las aguas del SAG para pozos seleccionados de las regiones: afloramientos, confinada próxima a la faja de afloramientos y alto confinamiento. Los análisis químicos de los pozos Remeros, San Nicanor, Daymán (Salto NO3 x-1), Guaviyú (NO4Q x-1), Nuevo Arapey (IMS, 2012) y Quintana (MEVIR) son inéditos. PSAG (2009) es la fuente para los pozos del área de afloramientos ubicados en las ciudades de Artigas, Rivera y Tacuarembó.

Los estudios isotópicos en el SAG revelaron que la edad de las aguas en zonas confinadas por basaltos, pero no lejos de las áreas de recarga, tiene varios miles de años de permanencia en el terreno y además que hacia el centro de la cuenca el agua está desprovista de ¹⁴C (Manzano y Guimaraens, 2012). En las regiones alejadas de las áreas de afloramiento y donde el SAG presenta un alto confinamiento, Mira *et al.* (2016) señalan para las aguas (provenientes de perforaciones en la provincia de Corrientes) edades (método ⁴He) superiores a 123 Ka. Todos estos datos sobre las edades del SAG permiten inferir que los tiempos de circulación y residencia de las aguas son elevados incluso cerca de las áreas de afloramiento, y para la región del SAG de mayor confinamiento

es posible que se esté en una situación no flujo (Gastmans *et al.*, 2012; Sindico *et al.*, 2018).

3.3. Usos del SAG

Las aguas subterráneas provenientes del SAG se utilizan para abastecimiento público y consumo humano de poblaciones rurales dispersas, actividades agropecuarias de abrevado de ganado y riego (principalmente hortifrutícola), abastecimiento de complejos termales, y, en menor escala, para uso industrial.

En el área de afloramientos del SAG, principalmente las ciudades de Rivera y Artigas y en menor medida Tacuarembó, se utilizan para abastecimiento público.

Otros poblados menores que se sitúan sobre la faja de afloramientos se abastecen exclusivamente de aguas subterráneas del SAG, por lo que este es el principal uso en la región de afloramientos (Figura 12). En esta región, es donde ocurre la mayor cantidad de perforaciones en predios privados con fines de consumo humano, riego e industrial. Si bien el número de perforaciones en el SAG para abastecimiento público no se diferencia mayormente de otros acuíferos de Uruguay (e incluso es inferior a otros acuíferos de menor extensión), el volumen extraído para este uso representa un tercio del agua subterránea total utilizada por la empresa pública Obras Sanitarias del Estado - OSE.

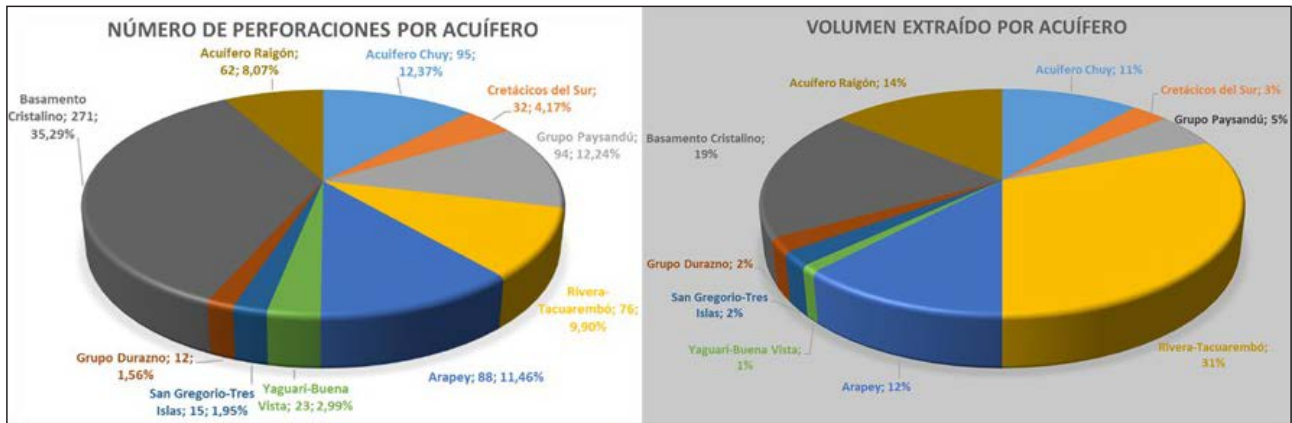


Figura 12. Diagramas que muestran la incidencia del Acuífero Guaraní en la explotación de agua subterránea para abastecimiento público en relación a otros acuíferos (Fuente: Conferencia de Andrés Pérez -OSE- en las *Jornadas Académicas del Instituto de Ciencias Geológicas*, Facultad de Ciencias, Montevideo, 2015)

En el Corredor Termal del Río Uruguay (alto confinamiento) el principal uso del SAG es el de recreación por los centros turísticos termales. Aunque estos centros representan una actividad de importantes ingresos, el elevado costo de perforación sumado a la inexistencia en el país de máquinas perforadoras adecuadas para esas profundidades y diámetros, ha provocado que el número de pozos destinados a ese fin sea limitado. Cabe aclarar que en Uruguay la capacidad operativa de las empresas perforadoras para alumbramiento de aguas subterráneas para cualquier uso está limitada a aproximadamente 250 m de profundidad. Existen algunos equipos de perforación para minería que permiten alcanzar profundidades de unos 1.000 m pero en diámetros que no son adecuados para la explotación.

En donde los basaltos de la Cuenca Norte alcanzan aproximadamente espesores superiores a los 50 m, el agua subterránea para riego, industria y consumo humano no es extraída del SAG. Bajo esta situación, se explotan directamente los pozos someros que captan agua del acuífero basáltico fisurado (Formación Arapey) y, en torno a la ciudad de Salto, de las areniscas que conforman el acuífero Salto (Formación Salto).

La gestión del SAG en Uruguay está regida por una serie de normas de las cuales, las principales y directamente aplicables se muestran en la Tabla 2. Algunas otras normas que hacen referencia lateralmente a la gestión de las aguas, en general, no fueron consideradas.

Tabla 2. Principales normas aplicables a la gestión del SAG en Uruguay.

Decreto Ley 14859/1978 Código de aguas	Establece el régimen jurídico de las aguas en la República Oriental del Uruguay
Decreto 214/2000: Plan de Gestión del Acuífero Infrabasáltico Guaraní en territorio de la República Oriental del Uruguay.	Se aplica a la captación de aguas termales. En él, además de abordar diferentes aspectos administrativos para el aprovechamiento de perforaciones infrabasálticas y la perforación de nuevas, establece una serie de condiciones específicas tales como: Depresión máxima del nivel dinámico, caudal instantáneo máximo, distancia entre perforaciones, etc.
Decreto 86/2004: norma técnica de construcción de pozos perforados para captación de agua subterránea.	Este decreto es de común aplicación en la zona aflorante y confinada (somera y media) ya que, para la perforación del Sistema Acuífero Guaraní, en la zona profunda, el artículo 57 remite al Decreto 214/2000 y sus modificativos.
Decreto 349/2005. Reglamento de EIA.	Establece la obligatoriedad de presentar EIA para tomas de agua subterránea capaces de extraer 50 l/s. Esto, en principio, excluye el caso del SAG ya que para el caso de los pozos termales (único caso donde las perforaciones superan dicho límite), el decreto 214/2000 fija como caudal máximo 42 l/s.
Ley 18.308/2008 Ordenamiento territorial y desarrollo sostenible.	Establece el marco regulador general para el ordenamiento territorial y desarrollo sostenible, sin perjuicio de las demás normas aplicables y de las regulaciones, que, por remisión de ésta, establezcan el Poder Ejecutivo y los Gobiernos Departamentales.
Norma UNIT 833:2008 "Agua potable. Requisitos".	Esta Norma establece un conjunto de requisitos que debe cumplir el agua potable para consumo humano, cualquiera sea su fuente de captación, tipo de tratamiento, producción y sistema de distribución. A través del Decreto 375/11 el Poder Ejecutivo modifica el Reglamento Bromatológico Nacional adoptando esta norma y a su vez OSE toma como base este Reglamento para establecer su Norma Interna de calidad de agua.
Ley 18.610/2009 Política Nacional de Aguas	Establece los principios rectores de la Política Nacional de Aguas dando cumplimiento al inciso segundo del artículo 47 de la Constitución de la República
Decreto 183/2013. Comisión Acuífero Guaraní.	Créase la Comisión del Sistema Acuífero Guaraní como órgano asesor del Consejo Regional de Recursos Hídricos constituido por el Decreto del Poder Ejecutivo N° 262/2011 de fecha 25 de julio de 2011
Decreto 205/2017 Plan Nacional de Aguas	La ley 18610 establece como Instrumento de la Política Nacional de Aguas la planificación a nivel nacional, regional y local ejercida mediante planes que contengan los lineamientos generales de la actuación pública y privada en materia de agua. A través del presente decreto se aprueba el Plan Nacional de Aguas.

4. ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO EN FUNCIÓN DEL SAG

Sobre la base de criterios geológicos, hidrogeológicos y socioeconómicos, se propone la zonificación del territorio ocupado por el Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay como insumo para discutir su gestión y protección ambiental (Figura 13).

Los principales aspectos técnicos contemplados en la propuesta son las características hidráulicas, forma de explotación, accesibilidad al recurso, calidad natural, vulnerabilidad a la contaminación antrópica y temperatura (Tabla 3).

a) La Zona A comprende las áreas de afloramiento de las unidades físicas que constituyen el SAG sumado a una faja de seguridad de 2 km de ancho a lo largo de su perímetro (*buffer*). El criterio de 2 km de ancho es el que se adopta en *Subsídios para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guaraní no Estado de São Paulo, Brasil* (Albuquerque *et al.*, 2012) y por la Agencia Nacional de Aguas del Brasil para los otros estados donde ocurre el SAG. Actualmente, la definición de esta zona en Uruguay se encuentra limitada por la disponibilidad de la cartografía geológica nacional a escala 1:500.000 (Preciozzi *et al.*, 1985), haciéndose notar que para el desarrollo de

herramientas de gestión es necesaria una escala de mayor detalle. La zona A constituye el área donde los recursos hídricos del SAG extraídos son renovables hasta un nivel equivalente a la recarga natural y, a su vez, es el área de mayor vulnerabilidad y sensibilidad ambiental. Por calidad, disponibilidad, accesibilidad y costos constituye la fuente más importante de agua subterránea para el abastecimiento de la población, pero la posibilidad de contaminación por actividades antrópicas en la superficie del terreno, marca la necesidad de adopción de directrices y controles que aseguren su no afectación por las cargas contaminantes aplicadas. De hecho, se han detectado en algunos casos, sobre todo en la ciudad de Rivera y alrededores, la presencia de contaminantes en el agua subterránea (particularmente nitratos) producto de las actividades agrícola-ganaderas y carencias en el saneamiento (Nolla, 2010; Pérez y Rocha, 2002), ya sea por la ausencia del mismo y/o la no conexión por parte de los usuarios.

b) La Zona B comprende el área donde el acuífero está cubierto por los basaltos desarrollándose a profundidades variables que oscilan desde los pocos a las centenas de metros. Está definida por los límites establecidos para la Zona A (afloramientos + *buffer*) y los que se adoptan para la Zona C (surgencia).

Esta zona es subdividida en 2 Subzonas (b1 y b2), siendo el límite entre ambas la isópaca de basaltos de 100 m. Este criterio está directamente vinculado a la posibilidad de infiltración efectiva del SAG del agua proveniente de los basaltos asumiéndose que, a partir de esos valores de espesores de basaltos, el acuífero se encuentra naturalmente protegido de las actividades antrópicas (excepto perforaciones). La zona B está caracterizada por una producción agropecuaria, donde el uso del agua subterránea se vincula a la explotación de los basaltos del acuífero Arapey. La naturaleza del SAG en esta zona es muy poco conocida por lo que su potencial explotación dependerá significativamente del avance en el conocimiento sobre la naturaleza del mismo.

c) La Zona C comprende la región en la que el acuífero está protegido por los mayores espesores de basalto y donde sus niveles piezométricos se ubican por encima de la superficie del terreno (surgencia). La cobertura basáltica asegura que el acuífero esté protegido y no resulte sensible a los impactos que pueden ocurrir debido a los diferentes usos del suelo (con excepción de aquellas

actividades que impliquen perforaciones profundas). Es en esta zona donde el SAG presenta las mejores condiciones para uso termal por caudal, temperatura y surgencia, características que permiten su actual explotación transfronteriza a lo largo del Corredor Termal del Río Uruguay. Sin embargo, esta zona es altamente sensible a efectos negativos ocasionados por la ausencia de una adecuada planificación y gestión del uso del recurso. Entre estos se destacan: el efecto de la interferencia hidráulica entre pozos vecinos (a la fecha hay nueve pozos geotérmicos en un área relativamente restringida) que podría reducir la surgencia y, en menor medida, disminuir la temperatura del agua subterránea; y el riesgo de intrusión de aguas del Pre-SAG por efecto de la extracción. Buenas prácticas tales como: el reciclado, la utilización en riego de jardines; la calefacción de áreas en instalaciones hoteleras, la reutilización y eliminación segura de los efluentes (particularmente si hay alta salinidad); y la combinación del recurso térmico con agua fría de acuíferos superficiales para usos que no requieren temperatura elevada, conducirán a un uso más racional y sostenible del agua termal.

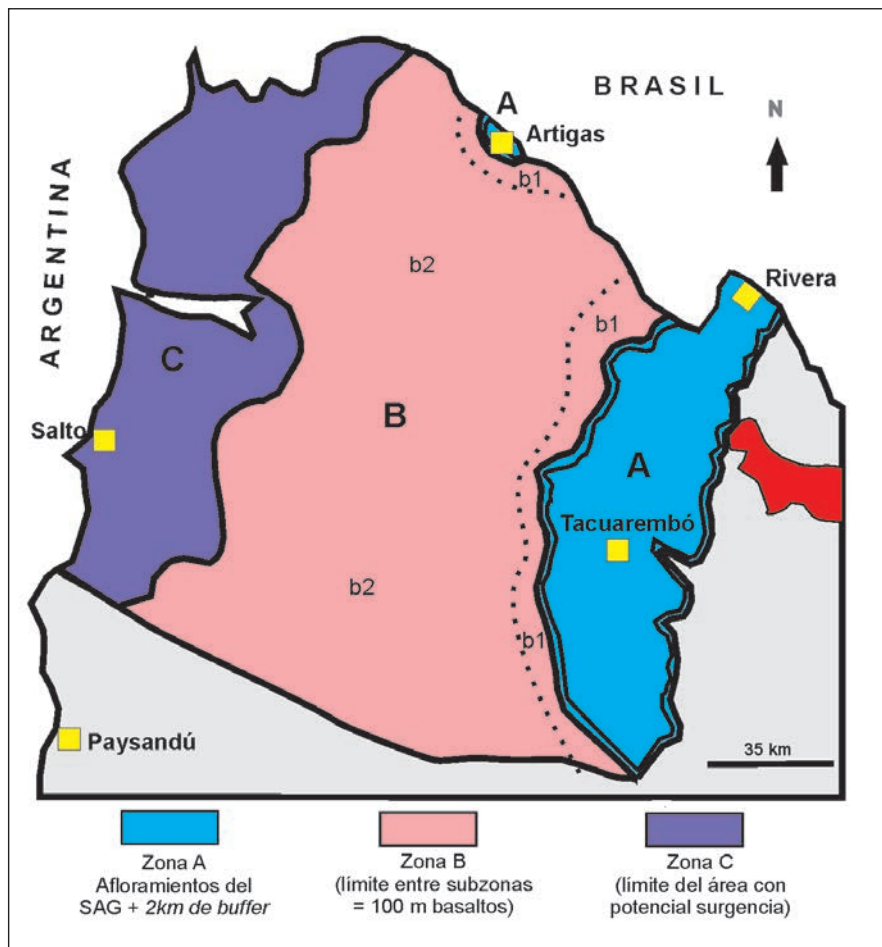


Figura 13. Propuesta de zonificación del SAG en Uruguay. El área *buffer* de la Zona A está exagerada para lograr la representación de la línea de afloramientos del SAG. La información de subsuelo para trazar el límite entre las Subzonas b1 y b2 provienen de Techera *et al.* (2017), Soto (2014) y de datos obtenidos para este trabajo. La línea de surgencia está parcialmente modificada de las propuestas de Lebac (2008) y Morales (2015).

Tabla 3. Resumen sobre los principales aspectos sobre la propuesta de Zonificación del SAG en Uruguay.

	Área de afloramiento		Área confinada	
	Zona A	Zona B		Zona C
		Zona b1	Zona b2	
Situación geográfica	Área de afloramiento y buffer, incluyendo las áreas de ventanas del basalto	Áreas confinadas próximas al afloramiento y basalto con espesor menor a 100m	Áreas confinadas mayor a 100 m hasta el límite de surgencia	Área de alto confinamiento con potencial de surgencia
Características hidráulicas	Agua proveniente de recarga. El almacenamiento es de tipo libre a semiconfinado. La velocidad del flujo del agua es más rápida que en las otras zonas. Las aguas son relativamente modernas.	Acuífero confinado, con posible recarga vertical descendente a través del basalto. La explotación puede inducir flujos laterales de agua de la zona de recarga, cuando ésta se encuentra próxima (decenas de km), aumentando la disponibilidad. La velocidad de flujo comienza a enlentecerse.	Características hidráulicas poco conocidas. Recarga vertical nula. Velocidad de circulación muy baja. Aguas "viejas"	Recarga vertical nula con posibles flujos verticales ascendentes (potenciometría mayor que los basaltos) Agua disponible que procede de su almacenamiento (S). Velocidad de circulación extremadamente baja a nula. Aguas antiguas > a 40.000 años
Forma de explotación recomendada	El caudal total explotable (caudal sostenible) debería definirse para la cuenca hidrográfica en función de la recarga del SAG, de sus funciones hidráulicas y ecológicas del flujo de base a los ríos y en otros cuerpos de agua superficial	El comportamiento del acuífero es semejante al sistema confinado. Debido a la proximidad del área de recarga, la explotación intensa (aumento de los gradientes hidráulicos) puede inducir a una mayor disponibilidad de agua para esas porciones del acuífero, trayendo agua de las áreas de afloramiento	Región actualmente inexplorada. Para esta área se asumen características intermedias para la explotación entre b1 y C. Necesidad de realización de estudios de evaluación del potencial hídrico de esta región.	Como no hay reposición del agua extraída por los pozos (zona de recarga distante y flujos lentos a nulos), la explotación de esas porciones del acuífero hace que la carga hidráulica decrezca con el tiempo. Esta situación hace necesario el control y la limitación de la explotación, considerando: a) la interferencia entre pozos b) la disminución de niveles piezométricos conduce a un aumento del costo de explotación (bombeo) c) la sostenibilidad de volúmenes extraídos vinculado al almacenamiento
Accesibilidad al recurso (costo de perforación y límite de bombeo)	Sin problema de acceso Pozos tubulares de medio y bajo costo	Sin problemas de acceso Pozos tubulares de costo medio	La explotación por pozo es limitada por el costo de las captaciones. Algunas actividades económicas (agrícolas, agro-industriales e industriales) pueden viabilizar la explotación hasta profundidades del entorno de los 250 m.	La explotación por pozo es limitada por el costo de las captaciones. Pozos tubulares pueden alcanzar más de 1.000 metros de profundidad, exigiendo altas inversiones y tecnología. Cuando el nivel dinámico del pozo alcanza los 400 m, hay limitación técnica y, sobre todo, económica de la explotación
Calidad natural	Sin problemas detectados	Sin problemas detectados	No hay datos	Áreas con problemas de salinidad y elementos tales como arsénico, cadmio y otros, en áreas específicas
Vulnerabilidad a la contaminación antrópica	Región con áreas de potencial alta vulnerabilidad	Baja vulnerabilidad. Potenciales problemas de contaminación a través de los basaltos fracturados.	Vulnerabilidad nula frente a los contaminantes de superficie.	Vulnerabilidad nula frente a los contaminantes de superficie. En el caso de la Región del corredor termal, efectos hidráulicos vinculados a la extracción pueden llevar a una situación de riesgo de contaminación por entrada de agua de estratos infrayacentes
Temperatura	Baja	Baja	La temperatura aumenta con el confinamiento en función de la fórmula: $T = 0.0274 * \text{espesor acuitardo superior} + 20.2$ (Oleaga 2002)	Igual al anterior. Los pozos existentes registran temperaturas entre 30°C y 48°C

5. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

El estado actual sobre el conocimiento de las características hidrodinámicas e hidroquímicas del SAG en Uruguay es heterogéneo y aún con vastas áreas inexploradas. No obstante, es posible establecer un modelo hidrogeológico conceptual básico que sustente, sobre una base técnica rigurosa, la construcción de una estrategia con el propósito de establecer pautas para su gestión y protección ambiental.

La propuesta de zonificación del SAG aquí presentada puede ser utilizada como orientación para la gestión del recurso en Uruguay y útil también para abordar varios de los aspectos transfronterizos que se pongan a discusión y/o tratamiento con los países que Uruguay comparte este recurso. La reciente ratificación de los cuatro países del "Acuerdo sobre el Acuífero Guaraní", con el objetivo promover la conservación y protección ambiental del SAG podría ser un nuevo impulso dinamizador. En ese sentido, en un mediano y largo plazo, podría propiciar una mejora en la gestión del Acuífero la que debería darse a través del intercambio de buenas prácticas y de nuevos esfuerzos para avanzar en el conocimiento del SAG, y no limitarse exclusivamente a la necesaria coordinación política y técnica de las cuestiones transfronterizas.

La Zona A es la de mayor vulnerabilidad a la contaminación del SAG siendo las principales actividades que amenazan la calidad natural de sus aguas: la urbanización y disposición de aguas residuales urbanas domésticas; los proyectos industriales que involucren el almacenamiento y manejos de productos químicos peligrosos asociados al tratamiento de efluentes y la disposición final de residuos sólidos; y la intensificación de la agricultura y la forestación. En esta zona se localizan las capitales departamentales de Rivera, Artigas y Tacuarembó las cuales deben tener en cuenta la importancia cada vez mayor del SAG para el abastecimiento de agua potable a sus poblaciones. Muy particularmente, en las dos primeras, donde además se suma su carácter transfronterizo, con situaciones de explotación intensa del otro lado de la frontera, las cuales deben ser evaluadas en función del potencial de uso del acuífero.

En las zonas B y C, el SAG se encuentra debajo de la cobertura basáltica. En la Subzona b1 existe posibilidad de recarga a través de los basaltos, y por lo tanto, se deberán adoptar medidas de protección del acuífero en función del tipo de actividad que se desarrolle en la superficie del terreno. En la Subzona b2 y la Zona C, los estudios realizados durante el PSAG sobre la velocidad de flujo del agua subterránea, aún para regiones cercanas a las áreas de recarga, permiten admitir una mínima vulnerabilidad a la contaminación, con excepciones para elementos persistentes y de gran movilidad

en el muy largo plazo (PEA, 2009). Las amenazas ambientales para el SAG en estas zonas, están relacionadas exclusivamente a las actividades que involucren perforaciones: explotación termal; explotación de aguas para usos industriales y riego; exploración - explotación de hidrocarburos; y explotación geotérmica. Estas actividades deben requerir de estudios de impacto ambiental para su realización además de ser controladas y monitoreadas por los organismos de gestión y protección de las aguas subterráneas.

La posibilidad de crecimiento de la demanda de aguas del SAG para uso extenso e intensivo, a corto plazo, se limita a las Zonas A y C. En ambas, el aumento de la demanda estará relacionada al tipo de actividad que hoy soportan y fueron señaladas precedentemente. La Zona C, por las condiciones de surgencia natural, temperatura y enormes caudales, reviste condiciones naturales para incrementar su explotación como recurso geotérmico de baja entalpía, con potencial para la expansión futura en el desarrollo de nuevos centros termales y varios usos industriales y procesos agroindustriales, aunque sus temperaturas son bajas para la generación de energía eléctrica convencional.

La normativa actual (Decreto 214/2000) se refiere a la gestión del Acuífero Guaraní, pero en función de la definición dada por el Proyecto SAG, algunas de las perforaciones que son utilizadas por los centros termales, explotan aguas del SAG y del PRE-SAG. En este sentido, a corto plazo, esta normativa debería ser objeto de revisión para atender la actual situación y enmarcar los futuros proyectos de pozos profundos para la captación de aguas termales en esta región dada, en particular, la implicancia ambiental (calidad de agua y efluentes).

Los esfuerzos que se deben realizar para avanzar en el conocimiento del SAG en la Zona B podrían propiciar o estimular su explotación en usos agrícolas, industriales y abastecimiento público. En especial, por aspectos económicos y operativos, en aquellas regiones donde las coberturas de basaltos no superen los 250 – 300m y, en particular, en regiones donde actualmente existen dificultades para la captación de aguas del acuífero Arapey por bajos caudales y/o calidad de agua.

A manera de síntesis se presentan las siguientes conclusiones:

- a) La zonificación del SAG en Uruguay en 3 zonas constituye un primer avance para el desarrollo de un intercambio científico-institucional que conduzca a la discusión y elaboración de pautas para la gestión de este Sistema Acuífero acordes a las diferentes situaciones hidrogeológicas que lo componen;
- b) El principal conflicto de gestión del agua subterránea en la Zona A se relaciona con su vulnerabilidad a la contaminación antrópica y el potencial incremento de elementos tales como

nitratos, cloruros y compuestos orgánicos derivados de la infiltración directa de aguas contaminadas. Adicionalmente, la elevada concentración de pozos en el área, sumado a que varios de estos no están catalogados en las bases de datos de los organismos gestores, provoca un desconocimiento del volumen real extraído del acuífero;

- c) La Zona B está prácticamente inexplorada y a su vez es poco conocida desde el punto de vista hidrogeológico, considerándose conveniente destinar esfuerzos y recursos para desarrollar el conocimiento con el fin de prever futuras situaciones de desarrollo de actividades sustentadas con base en la extracción de aguas subterráneas, inicialmente, en áreas seleccionadas con dificultades para la captación de aguas en el Acuífero Arapey;
- d) En la Zona C el elevado costo de captación de aguas subterráneas podría suponer un desarrollo relativamente lento de la perforación de nuevos pozos. Un mayor control de las extracciones de los pozos actuales y potenciales futuros ha de profundizar en el entendimiento del SAG y su comportamiento auxiliando a prevenir, por ejemplo, pérdidas potenciales de surgencia y temperatura. La consideración de la disposición de los efluentes salinos debe ser parte de una agenda sobre las buenas prácticas de uso del acuífero;
- e) Las características hidrodinámicas e hidroquímicas concebidas en el modelo hidrogeológico conceptual del SAG sustentan que las cuestiones transfronterizas sobre su gestión quedan limitadas, desde el punto de vista físico, a una estrecha faja de algunos kilómetros, la cual debería ser definida técnicamente en un futuro a través de estudios conjuntos entre los países involucrados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguirre, C., Ferraresi, P., Ibáñez, S.P. y Rodríguez Schelotto, M.L. 2008. LCV Síntesis – Muestras de Subsuelos y Afloramientos (Perfiles Relevados por PyT Consultora SRL). Proyecto para la Protección Ambiental y el Desarrollo Sustentable del Sistema Acuífero Guaraní, 23 p.

Albuquerque Filho, J.L., De Carvalho, A.M., Ikematsu, P., Costa Barbosa, M., Iritani, M., Nogueira Pressinotti, M.N., Rocha, G., Pereira Militão da Silva, M. y Theodorovicz, A. 2012. Diretrizes para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guaraní no estado de São Paulo, Brasil. Boletín Geológico y Minero, 123 (3): 353-366.

Araújo, L.M., França, A.B. y Poter, P.E. 1995. Acuífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai; Mapas hidrogeológicos das Formações

Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Mapas. UFPR-Petrobras, Curitiba, Texto Explicativo, 16 p.

Araújo, L.M., França, A.B. y Poter, P.E. 1999. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. Hydrogeology Journal, v. 7: 317-336.

Bochi do Amarante, F. 2017. Arquitetura de facies e evolução estratigráfica da Formação Tacuarembó, Bacia Norte-UY. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 40 p.

Bossi. J. y Heide, E. 1970. Carta geológica del Uruguay, escala 1: 100.000. Segmento Río Arapey, sector XVIII. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo, 35p.

Bossi, J., Ferrando, L., Elizalde, G., Morales, H., Ledesma, J., Carballo, E., Ford, I. y Montaña, J. 1975. Carta Geológica del Uruguay a escala 1:1.000.000. Dirección de Suelos y Fertilizantes (MGAP), Montevideo, 32 pp.

Bossi, J. y Schipilov, A. 2007. Rocas ígneas básicas de Uruguay. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, 364 p.

Carrión, R. y Massa, E. 2011. Caracterización hidroquímica de las regiones termales recreativas de Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología. Informe interno, Montevideo, 12 p.

Decoud, P. y Rocha, L. 2000. Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guaraní en el NW del Uruguay. 1st Joint World Congress on Groundwater, Actas en CD - ROM, Fortaleza (Fuente: <https://aguassubterranas.abas.org/asubterranas/issue/view/1191>)

de Santa Ana, H. y Veroslavsky, G. 2003. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico-Cretácico Temprano, En: Veroslavsky G, Ubilla M y Martínez S (eds.): Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales – Mesozoico. DIRAC – Facultad de Ciencias, Montevideo, p. 51-47.

de Santa Ana, H., Veroslavsky, G., Fulfaro, V. J. y Rossello, E. 2006. Evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero – Pérmico de la Cuenca Norte. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico. DIRAC - Facultad de Ciencias, Montevideo, p. 209-256.

DINAMIGE. 2009. Estimación de la extracción de agua subterránea: principales acuíferos de Uruguay. Informe de Hidrogeología – DINAMIGE. (Fuente: http://www.miem.gub.uy/sites/default/files/estimacion_de_extraccion_anual_de_aguas_

- subterráneas_en_los_principales_acuíferos_del_uruguay.pdf)
- Ferrando, L., Andreis, R.R. y Montaña, J. 1987. Estratigrafía del Triásico-Jurásico uruguayo en la Cuenca de Paraná. *Actas III Simposio Sul-Brasileiro de Geología*, Curitiba. SBG, 1: 373-378.
- Fernandes A.J., Negri, F.A., Azevedo, J.M. y Varnier, C. 2011. Investigação regional do potencial da recarga do Sistema Aquífero Guaraní através dos basaltos do Aquífero Serra Geral. En: *A gestão do Sistema Aquífero Guaraní: um exemplo de Cooperação / Organizadores: R. Hirata, G. Rocha, F. Sindico.* – São Paulo: IGc/USP, 88 p.
- Fernandes, A.J., Negri, F., Azevedo Sobrinho, J.M., Varnier, C. y Janasi, J. 2012. Análise de fraturas dos basaltos do Aquífero Serra Geral e o potencial de recarga regional do Sistema Aquífero Guaraní, *Boletín Geológico y Minero*, 123: 325 – 339.
- Frikely S.A. 2015. Solicitud de autorización ambiental previa. Informe ambiental resumen. Complejo Termal Marino del Hum. Disponible en: <http://www.mvotma.gub.uy/portal/ambiente-territorio-y-agua/gestiona/puesta-de-manifiestos/item/10007371-frikely-s-a.html>
- Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G. y Garduño, H. 2009. La Iniciativa del Acuífero Guaraní – Hacia la Gestión Realista del Agua Subterránea en un Contexto Transfronterizo. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea Lecciones de la Práctica*. WG Mate – The world bank (acceso: <file:///C:/Users/Usuario/Desktop/transboundary.-groundwater-management-issues-for-guarani-aquifer-368-spanish.pdf>)
- Gamazo, P., Ramos, J., Olivera, M., Sapriza, G., Batista, L., Lacués, X., Panizza, A., Ribero, V. y Manganelli, A. 2016. Modelo matemático del Acuífero Guaraní para la gestión de explotaciones termales en la zona de Concordia (Entre Ríos, Argentina) y Salto (Uruguay). IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Catamarca, Argentina
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Chang, H.K., Caetano-Chang, M.R. y Nogueira Pressinotti, M.M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3): 249-265.
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Chang, H.K., Marmisole, J. y Oleaga, A. 2010. Influência do Arcabouço Hidroestratigráfico nas Ocorrências de Arsênio em Águas Subterráneas ao Longo do Corredor Termal do Rio Uruguai (Argentina-Brasil-Uruguai). *Geociências*, 29: 105-120.
- González, S. y de Santa Ana, H. 1998. Caracterización de la secuencia Eomesozoica continental en la región noroccidental de la Cuenca Norte (Uruguay). *Actas 2º Congreso Uruguayo de Geología*, Punta del Este, 43-48p.
- Gómez, A.A. 2007. Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las formaciones Tacuarembó - Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay. Tesis de Magister en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 149p.
- Hirata, R., Gastmans, D., Santa Cruz, D.N., Soares, P.C, Faccini, U., Araguas, L. y Vives, L. 2009 Modelo conceitual, funcionamiento e potencialidades do Sistema Aquífero Guaraní. En: *Congresso Aquífero Guaraní Memória / II Congresso Aquífero Guaraní*, 4 a 7 de Novembro de 2008, Ribeirão Preto, SP.
- Heinzen, W., R. Carrión, E. Massa, S. Pena y M. Staff. 2003. Mapa hidrogeológico - República Oriental del Uruguay. Dinamige, Montevideo, Mapa.
- Lebac. 2008. Informe Final de Hidrogeologia do Projeto Aquífero Guaraní. Coord.: Gastmans, D. y Chang, H.K. Equipe: Paula e Silva, F., Correa, S.F., Informe Técnico – Consórcio Guaraní. Rio Claro, 172 p.
- Machado, J.L.F. 2005. Compartimentação Espacial e Arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guaraní no Rio Grande do Sul. Tese, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo (RS), 238 p.
- Manzano, M. y Guimaraens, M. 2008. Hidroquímica regional del SAG. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní. Informe realizado para el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní a través del consorcio de empresas Tahal Consulting Engineers, SEINCO S.R.L. Hidroestructuras S.A., Hidrocontrol S.A. e Hidroambiente S.A. 223 p.
- Manzano, M. y Guimaraens, M. 2012. Hidroquímica del Sistema Acuífero Guaraní e implicaciones para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (3): 281-295.
- Marmisolle, J. 2015. Análisis tectonosedimentario de depocentros en el sector noroeste de la Cuenca Norte: estudio de relictos precarboníferos. Tesis de Maestría, PEDECIBA – Facultad de Ciencias, Montevideo, 139p.
- Marmisolle, J., Veroslavsky, G. y de Santa Ana, H. 2016. Depocenters with potential preservation of pre-Carboniferous rocks in Norte Basin – Uruguay. In: *SEG - International Conference and Exhibition*, Barcelona, Spain.
- Mesa, V. y Perea, D. 2015. First Record of Theropod and Ornithopod Tracks and Detailed Description of Sauropod Trackways from the Tacuarembó Formation (Late Jurassic-? Early Cretaceous) of Uruguay. *Ichnos*, 22(2):109-121.

- Mira, A., Veroslavsky, G., Vives, L. y Rodríguez, L. 2016. Influencia de los lineamientos estructurales sobre el flujo del Sistema Acuífero Guaraní en la provincia de Corrientes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73 (4): 478 – 492.
- Montaño, J. 2003. Recursos hídricos subterráneos. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), *Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico*. DIRAC - Facultad de Ciencias, Montevideo, p. 191-212.
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Elía, M., Pérez, A., Nagy, M., Collazo, P. y Decoud, P. 1998. Acuíferos regionales en América Latina. SAG. Capítulo argentino – uruguayo. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 217 p.
- Morales, E. 2015. Potencial geotérmico del departamento de Artigas. Informe de Asesoramiento Técnico para la Intendencia Municipal de Artigas, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Montevideo, 23p.
- Nolla, G. 2010. Usos agrícolas intensivos de suelos y su relación a la calidad de las aguas que infiltran al Sistema Acuífero Guaraní en la zona periurbana de la ciudad de Rivera, Uruguay. Tesis de Maestría. Universidad de León. 143 p.
- Oleaga, A.B. 2002. Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector de Uruguay: un enfoque integral. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM, Ciudad de México, 119 p.
- PEA. 2009. Acuífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações / Acuífero Guaraní: Programa Estratégico de Acción - Edición español / portugués. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p.
- Perea, D., Soto, M., Veroslavsky, G., Martínez, M. y Ubilla, M. 2009. A Late Jurassic fossil assemblage in Gondwana: Biostratigraphy and correlations of the Tacuarembó Formation, Parana Basin, Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences*, 28: 168-179.
- Pérez, A. y Rocha, L. 2002. Aportes al conocimiento del Acuífero Guaraní. Área ciudad de Rivera - Uruguay. *Groundwater and Human Development*. Bocanegra, E., Martínez, O., Massone, H. (Eds) 2002. ISBN 987-544-063-9. Mar del Plata. Argentina.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W. y Rossi, P. 1985. Memoria Explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500.000. DINAMIGE, Montevideo, 90 p.
- P y T Consultora SRL. 2007. informe Final de Relevamientos Geológicos, Relatorio Técnico, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, Buenos Aires, 93 p.
- Rocha, G.A. 1996. Mega reservatório de água subterrânea do Cone Sul: bases para uma política de desenvolvimento e gestão. *Contribuição ao Seminário Internacional "Acuífero Gigante do Mercosul"*. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 26 p.
- Rodríguez, P., G. Veroslavsky, M. Soto, J. Marmisolle, P. Gristo y H. de Santa Ana. 2015. New integrated Bouguer gravity anomaly map inshore Uruguay: preliminary implications for the recognition of crutal domains. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1515-1519 p.
- Sindico, F., Hirata, R. y Manganelli, A. 2018. The Guaraní Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>
- Soto, M. 2014. Geología de la región de Pepe Núñez, Cuenca Norte – Uruguay. Tesis de Maestría, PEDECIBA – Facultad de Ciencias, Montevideo, 381 p.
- Soto, M., De Carvalho, M.S.S., Maisey, J.G, Perea, D. y Da Silva, J. 2012. Coelacanth remains from the Late Jurassic-?earliest Cretaceous of Uruguay: the southernmost occurrence of the Mawsoniidae. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 32(3): 530-537.
- Soto, M. y Perea, D. 2008. Aceratosaurid (Dinosauria, Theropoda) from the Late Jurassic-Early Cretaceous of Uruguay. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 28 (2): 439-444.
- Techera, J., Massa, E., Izquierdo, D. y Pérez, S. 2017. Mapa del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología, Montevideo, (disponible: <http://www.dinamige.gub.uy>).
- Ucha, N. y de Santa Ana, H. 1990. Evaluación del potencial hidrocarburífero del sector noroccidental de la Cuenca Norte uruguaya. División Investigación y Desarrollo, ANCAP, Montevideo, 140 p.
- Vives L., Rodríguez, L., Gómez, A. y Cota, S.D.S. 2008. Modelación Numérica Regional del Sistema Acuífero Guaraní. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní. Global Environment Facility (GEF). Informe Técnico. 144 p.
- Wahnfried I., Fernandes, J.A. y Hirata, R. 2010. Modelo conceitual de fluxo para o Aquitarde Serra Geral e Sistema Acuífero Guaraní em Ribeirão Preto – SP. En: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, Boletim de Resumos, 12 p.