

Recursos hídricos subterráneos del Uruguay

J. Montaño Xavier, S. Gagliardi y M. Montaño

Facultad de Ciencias. Iguá 4225. Montevideo, Uruguay
E-mails: montanox@movinet.com.uy - sgagliar@internet.com.uy - mmontano@internet.com.uy

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla una visión general de los recursos hídricos del Uruguay y su importancia como fuente de abastecimiento humano y de riego. Se comienza con una descripción de las características físicas y socioeconómicas del país para luego caracterizar en forma sucinta la geología. Referido a los recursos hídricos subterráneos se detallan las características de cada uno de los acuíferos indicando su potencialidad en función de su productividad representada por valores de caudal específico. Se incluyen datos de parámetros hidráulicos en zonas donde se realizaron estudios de detalle. Sobre calidad del agua subterránea se describen las anomalías naturales, zonas de contaminación y sobreexplotación de acuíferos. Por último se realiza una descripción de la estructura administrativa del manejo del agua, y los aspectos normativos y del desarrollo del conocimiento.

Palabras clave: acuíferos, calidad, productividad, reservas, Uruguay

Groundwater resources in Uruguay

ABSTRACT

This work gives a general vision of the groundwater resources in Uruguay and its importance as a source of human supply and watering. The work begins with a description of the physical and socio-economic characteristics of the country in order to characterize in succinct form the geology. About groundwater resources, the characteristics of each aquifers, its potentiality according to its productivity which is represented by the values of specific flow, is shown. Hydraulic parameters are included in areas where important studies were made. Natural anomalies about water quality, places of contamination, and the overexploitation of the aquifers are described. At the end of the work, a description of the administrative structure of the water handling, and normative aspects and the knowledge development are described.

Key words: aquifers, productivity, quality, reserves, Uruguay

Introducción

Tradicionalmente el uso los recursos hídricos en el Uruguay se sustentó en la explotación de las aguas superficiales derivado de la gran densidad de su red hidrográfica. A partir de 1950 comenzó la utilización intensiva de los recursos hídricos subterráneos, principalmente para abastecimiento humano de centros poblados del interior del país, cubriendo actualmente el 70% de estos casos. Esta evolución fue consecuencia principalmente del menor costo del agua subterránea, su disponibilidad y buena calidad.

A partir de 1980 se intensifica aún más el uso del agua subterránea, principalmente con el fin de satisfacer las demandas de riego en los sectores productivos de hortalizas, tanto a cielo abierto como en invernadero, árboles frutales e industria lechera. También fue utilizado como un recurso estratégico para impedir el ingreso de cólera al país en los años 90 con un

programa fronterizo de abastecimiento de pequeñas comunidades.

Además se distingue la utilización de aguas termales y surgentes del Sistema Acuífero Guaraní como fuente de abastecimiento de complejos turísticos termales, en un área reducida pero con un potencial hídrico importante, cuya explotación genera importantes ingresos de divisas al país por turismo regional.

Igualmente se puede establecer que Uruguay no presenta una riqueza hídrica subterránea significativa, debido a que casi un 65% de sus acuíferos son fisurados y de productividad relativamente baja, estando el resto compuesto por acuíferos porosos de variada potencialidad.

Marco físico

La República Oriental del Uruguay está situada al

SE de América del Sur, en la zona templada del hemisferio meridional entre los 30° y los 35° de latitud sur, y los 53° y 58° de longitud este. Limita al N y NE con Brasil, al SE con el Océano Atlántico, al S con el Río de la Plata y al O con Argentina, Río Uruguay de por medio. Ocupa una superficie de 176.215 kilómetros cuadrados terrestres y 142.000 kilómetros cuadrados de aguas jurisdiccionales y mar territorial, en la confluencia del río Uruguay, el Río de la Plata y el Océano Atlántico. El territorio es suavemente ondulado, con elevaciones en cadena –cuchillas– como paisaje típico. La altitud media del país es de 116,7 metros, y el punto más alto –Cerro Catedral, en la Sierra de Carapé– está a 513,66 metros sobre el nivel del mar. El clima es templado, sin grandes oscilaciones.

Las temperaturas medias anuales se sitúan entre 16°C al SE y 20°C al NO. La precipitación media anual varía entre 1.000 mm al sur del país y 1.300 mm en el norte, no existiendo una temporada marcada de lluvias. Los suelos son aprovechables en su totalidad, resultando aptos para el desarrollo de la agricultura y la ganadería.

El país posee unos 450 km de costas a lo largo del Río de la Plata y 220 de costas marítimas. Este litoral ofrece una sucesión de playas arenosas, de gran interés turístico, alternadas con puntas pedregosas. La

red hidrográfica es extensa, existiendo buena disponibilidad de recursos hídricos en calidad y cantidad (18.900 m³ per cápita). Como muestra la Figura 1 las principales cuencas hidrográficas son: Río Uruguay, Río de la Plata, Río Negro, Río Santa Lucía, Océano Atlántico y Laguna Merín, pertenecientes las cuatro primeras a la cuenca principal del Río de la Plata, mientras que las dos últimas vierten sus aguas directamente al Océano Atlántico.

Marco geológico

Las rocas más antiguas del Uruguay pertenecen al Precámbrico y están comprendidas según Bossi *et al.* (1998) en tres unidades tectono-estratigráficas mayores (terrenos) con diferencias litológicas, evolutivas y estratigráficas respecto de las unidades vecinas: Terreno Piedra Alta, Terreno Nico Pérez y Terreno Cuchilla Dionisio, adosados por dos mega transcurencias o zonas de cizalla de escala continental: Zona de Cizalla Sarandí del Yi-Pirlápolis y Zona de Cizalla Sierra Ballena (figura 2).

- El Terreno Piedra Alta comprende tres cinturones metamórficos, dos de grado bajo (Arroyo Grande y San José) y uno de grado medio (Montevideo), constituido cada uno por una secuencia metamór-

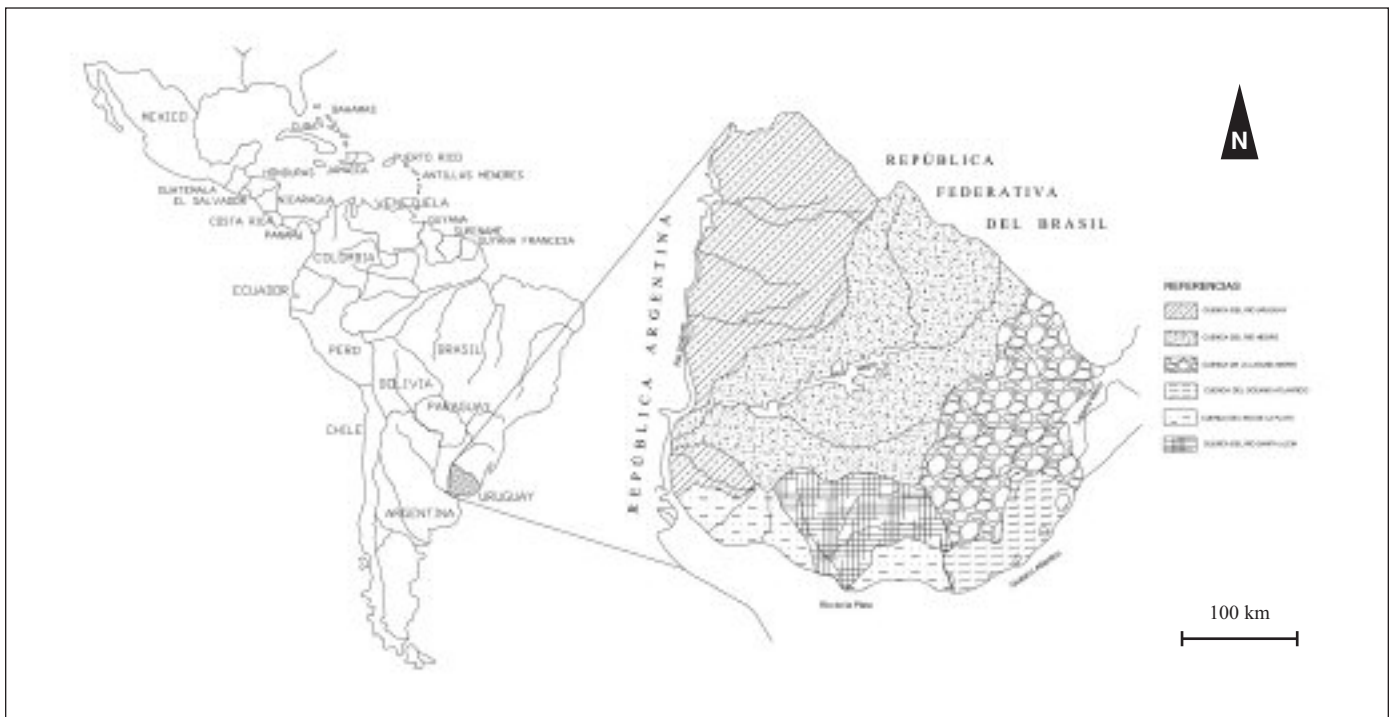


Fig. 1. Cuencas hidrográficas del Uruguay
Fig. 1. Hydrographic basins of Uruguay

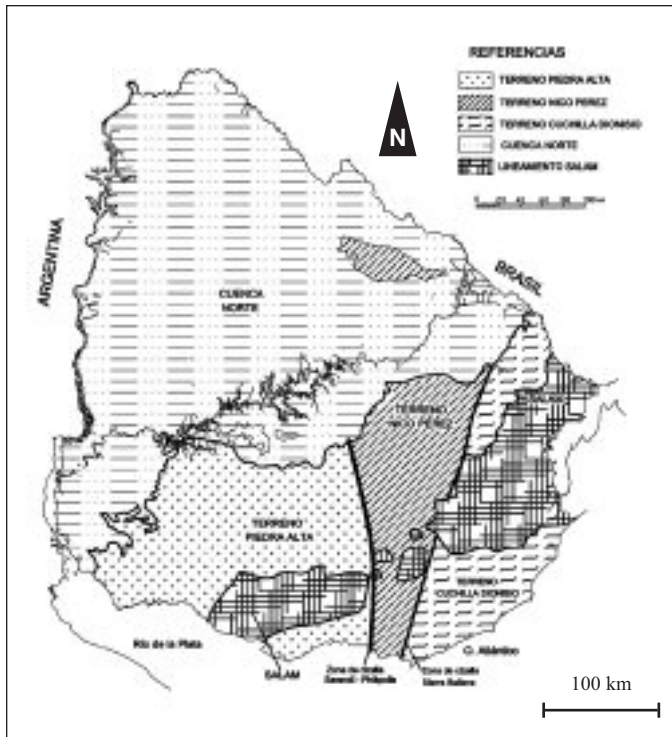


Fig. 2. Unidades tectonoestratigráficas precámbricas y cuencas fanerozoicas del Uruguay

Fig. 2. Precambrian tectonostratigraphic units and Phanerozoic basins of Uruguay

fica volcano-sedimentaria y por intrusiones plutónicas asociadas. Los cinturones están separados entre sí por extensas áreas granito-gnéissicas. Entre las litologías que integran este terreno se cuentan rocas graníticas y granodioríticas variadas, gabros, gneisses, anfibolitas, filitas, pizarras, esquistos, metareniscas, metabasaltos, metandesitas, metariolitas, etc.

- El Terreno Nico Pérez se desarrolla entre la mega transcurrencia Sarandí del Yi-Pirlápolis y la zona de cizalla de Sierra Ballena. Agrupa rocas metaígneas y metasedimentarias de distintos grados de metamorfismo, entre las que se incluyen gneisses, piroxenitas, cuarcitas, calizas, granitoides de edad diversa, milonitas y protomilonitas, metareniscas, metapelitas, etc.
- El Terreno Cuchilla Dionisio, desarrollado al E de la Zona de cizalla de Sierra Ballena, agrupa un conjunto de asociaciones litológicas de distinto grado de metamorfismo (protomilonitas, milonitas, rocas graníticas fuertemente deformadas, gneisses, migmatitas, rocas metasedimentarias de grado bajo y muy bajo) dispuestas en varias estructuras groseramente paralelas de rumbo general NNE.

Las rocas precámbricas de Uruguay constituyen el basamento sobre el cual se desarrollan las cuencas fanerozoicas (figura 2): Cuenca Norte (De Santa Ana, 2004) y Lineamiento Santa Lucía-Aiguá-Merín (SALAM) (Veroslavsky *et al.*, 2003) que agrupa las cuencas de Santa Lucía y de la Laguna Merín además de otras de menor importancia.

Al comienzo del Fanerozoico, tras un período de no sedimentación durante el Ordovícico y el Silúrico, se presenta un importante paquete de sedimentos de edad Devónica que se apoyan sobre el basamento cristalino y alcanzan espesores cercanos a los 300 m. Estos sedimentos se separan en tres formaciones que afloran en el centro este del país y que reflejan un período transgresivo completo del nivel del mar. Estas formaciones son, de base a techo:

- Formación Cerrezuelo: constituida por arcosas gruesas a finas, pefitas en cantidades menores (sabulitas y conglomerados de guijas cuarzosas) y pelitas caoliníticas, definiendo una secuencia granodecreciente depositada en un ambiente marino transicional (Bossi y Navarro, 1991).
- Formación Cordobés: integrada por pelitas (tanto limolitas como arcilitas) de color gris claro a gris oscuro, con areniscas finas, medias y gruesas de aparición esporádica; el ambiente de sedimentación es marino (Bossi y Navarro, 1991).
- Formación La Paloma: secuencia granocreciente de ambiente transicional, que incluye desde pelitas más frecuentes en la base, a conglomerados finos en el techo de la formación (Bossi y Navarro, 1991).

Luego de un nuevo período erosivo durante el Carbonífero comienza, a partir del Carbonífero Superior-Pérmico inferior, la sedimentación en el ámbito de la denominada Cuenca Norte Uruguaya. Esta cuenca forma parte de la Cuenca intracratónica Chaco Parananense la cual se desarrolla también en los territorios de Argentina, Brasil y Paraguay. Abarca una superficie de 94.000 km² en el sector noroccidental del país, de los cuales aflora en 24.000 km²; está cubierta por rocas efusivas cretácicas y sedimentos modernos (De Santa Ana, 2004).

Las Formaciones que conforman la cuenca se agrupan en: Eogondwana (Formaciones San Gregorio, Tres Islas, Melo y Yaguarí), de edad básicamente Pérmica y Pérmica superior y Neogondwana (Formaciones Buena Vista, Cuchilla del Ombú, Tacuarembó y Rivera), de edad Triásico y Jurásico.

- La Formación San Gregorio, de ambiente glacial, está constituida por diamictitas resedimentadas, tillitas y, en menores proporciones, conglomerados clastosoportados (De Santa Ana, 2004), mientras que la Formación Tres Islas marca un pasaje

hacia un ambiente deltaico y fluvial, representado por psamitas finas hasta muy gruesas, a veces algo sabulíticas, con porcentajes importantes pero variables de pelitas y cantidades subordinadas de psefitas.

- La Formación Melo (Bossi *et al.*, 1998) representa una nueva transgresión marina, siendo las facies dominantes arenosas y heterolíticas; asociándose a éstas, en menor proporción, facies pelíticas, psefiticas, de colores verde amarillento, grises claros hasta negro (reductor); todo este conjunto fue depositado en un ambiente marino restringido.
- La Formación Yaguarí (psamitas y pelitas macizas o laminadas) marca una continentalización gradual. Se separan en esta unidad dos miembros: uno inferior compuesto por materiales finos y uno superior más arenoso, depositados en un ambiente transicional fluvial.
- Continuando en un régimen continental, la Formación Buena Vista (Triásico), de ambiente fluvial, integra areniscas finas hasta gruesas y menores cantidades de pelitas, conglomerados finos clasto sostenidos y brechas intraformacionales, con tonalidades predominantemente rojizas.
- El Jurásico está representado por las Formaciones Cuchilla del Ombú (areniscas medias a finas de ambiente eólico) que no superan los 10 m de espesor en la localidad tipo (Montaño, 2005); Tacuarembó (areniscas finas y muy finas, pelitas e intraconglomerados, con colores claros, neutros a levemente reductores, de ambiente fluvio lacustre con eventos eólicos) y Rivera (areniscas eólicas en estructuras dunares, medias y medias a finas, con menor participación de psamitas finas de colores rojizos, depositadas en ambiente desértico por transporte eólico).

Estas secuencias sedimentarias están cubiertas en parte por potentes coladas basálticas correspondientes al denominado Magmatismo Mesozoico (Muzio, 2003).

Estos depósitos efusivos están ligados a la apertura del Océano Atlántico en el período que abarca desde el Jurásico superior al Cretácico inferior (150 a 115 Ma). Durante esta etapa se desarrolló el Lineamiento Santa Lucía-Aiguá-Merín (SALAM), un extenso corredor estructural con dirección ENE a NE que alberga importantes acumulaciones y registros geológicos de edad Jurásico-Cretácico Temprano, y en el que se incluyen como más importantes las fosas tectónicas de la Laguna Merín y de Santa Lucía (Veroslavsky *et al.*, 2003).

Al mismo tiempo que se produjo la efusión de alrededor de 20.000 km³ de basaltos y se inyectaron múltiples filones capa de entre 50 a 100 m de poten-

cia a una profundidad estimada entre 300 y 1.000 m. El trasvase repentino de esos volúmenes de lavas básicas desde el manto a la superficie de la corteza generó enormes desequilibrios isostáticos que produjeron fracturas y fallas hasta largo tiempo después de culminado el magmatismo. Parte de ellos están activos todavía o por lo menos lo estuvieron hasta hace muy poco tiempo.

Este magmatismo que prácticamente abarcó la totalidad del territorio, presenta rasgos diferenciales que permitieron dividirlo en grandes unidades de comportamiento disímil. Bossi y Umpierre (1975) plantearon la existencia de dos cuencas tectónicamente diferenciadas: a) una cuenca intracratónica en el noroeste del Uruguay con derrames de basalto de *plateau* (Formación Arapey) y *sills* de estilo micropolitico (dentro de la Cuenca Norte); b) una cuenca pericratónica asociada a grandes fosas tectónicas (Santa Lucía, Merín, etc), donde el magmatismo es fuertemente diferenciado, desde basaltos olivínicos (Formación Puerto Gómez) hasta riolitas (Formación Arequita), que se desarrollan en el SE.

Preciozzi *et al.* (1985) separan los *sills* como unidad estratigráfica independiente y definen la Formación Cuaró.

Durante el Cretácico tienen lugar episodios de sedimentación que generan depósitos de importantes espesores tanto en la Cuenca Norte (Formaciones Guichón y Mercedes, Goso y Perea 2003) como en las Cuencas de Santa Lucía y Laguna Merín (Formaciones Migue y Mercedes).

- La Formación Migue contiene conglomerados y areniscas arcósicas finas a muy finas y abundantes pelitas depositadas en ambiente lacustre y fluvial, alcanzando espesores mayores a los 2.000 m en las fosas tectónicas del SALAM.
- La Formación Guichón (Cretácico Medio a Superior) está constituida por areniscas conglomerádicas hasta pelíticas. Areniscas feldespáticas a arcósicas, medias a finas, arcillosas, de color rojizo depositadas en ambiente fluvial, no superando los 100 m de espesor. La Formación Mercedes (Cretácico Superior), también de ambiente fluvial, está integrada por arenas finas a medias, areniscas finas, gruesas y conglomerádicas de color predominantemente blancuzco a rosado, con cemento generalmente arcilloso y calcáreo con presencia de lentes calcáreos. Presenta en gran parte de su extensión procesos de ferrificación. Algunos autores han separado este manto ferrificado denominándolo Formación Asencio (Bossi y Navarro 1991), otros (Goso y Perea 2003) lo mantienen dentro de la Formación Mercedes; adoptamos aquí el criterio de Goso y Perea 2003.

Marco institucional

En lo que respecta a los recursos hídricos, una reciente reforma de la Constitución de la República Oriental del Uruguay establece que los recursos hídricos del Uruguay están en manos del Estado, no pueden ser privatizados y su manejo es exclusivo de personas jurídicas estatales. Además de lo establecido en la Constitución, el Código de Aguas (Ley N° 14.859) determina el régimen jurídico de las aguas en el Uruguay.

El manejo de los recursos hídricos y el abastecimiento público de agua potable recae fundamentalmente en dos organismos:

- La Dirección Nacional de Hidrografía (DNH), incluida en el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), tiene como cometido proyectar y elaborar las propuestas normativas para la utilización y desarrollo sostenido de los recursos hídricos y controlar el cumplimiento de la normativa vigente. Administra y evalúa el uso de los recursos hídricos; proyecta y controla el desarrollo de los puertos y obras costeras; así como su operación y mantenimiento. Además proyecta y controla el mantenimiento por dragado de las vías navegables, y regula las extracciones de áridos subacuáticos.
- Obras Sanitarias del Estado (OSE) tiene a su cargo el abastecimiento de agua potable en todo el territorio nacional. El servicio cubre 2.996.750 habitantes, a través de 756.282 conexiones, lo que significa una cobertura de la población nucleada del 98%.

Existen además distintos Proyectos, Comisiones locales y regionales, y Organizaciones no Gubernamentales con objetivos más particulares, como el fomento del riego, la administración y regulación de los ríos fronterizos, la protección de los recursos hídricos, etc.

La investigación científica, en lo que refiere a las aguas subterráneas, se da fundamentalmente a nivel de la Universidad de la República, pero también en la DNH, en la Dirección Nacional de Minería y Geología (DINAMIGE) y OSE.

Provincias hidrogeológicas del Uruguay

En Uruguay, dada la conformación geológica del subsuelo, existen varias regiones que ofrecen la posibilidad de explotar los recursos hídricos subterráneos. Por un lado, en aquellas cuencas sedimentarias que poseen unidades en el subsuelo con buena porosidad

y permeabilidad, permitiendo que el recurso agua se aloje en los poros (acuíferos porosos). Y por otro lado, es posible extraer agua subterránea en áreas constituidas por rocas cristalinas, en donde el agua se almacena en diaclasas y fallas interconectadas (acuíferos fisurados).

El territorio se divide en tres Provincias Hidrogeológicas concordando con la Carta Hidrogeológica del Uruguay a escala 1:200.000 (Heinzen *et al.*, 1986): Provincia Hidrogeológica Paranaense, Provincia Hidrogeológica Meridional y Provincia Hidrogeológica Costera. Esta división responde a su vez a los criterios establecidos por UNESCO (1981) para la elaboración del Mapa Hidrogeológico de América del Sur y la separación de provincias hidrogeológicas (regiones de características generales similares en cuanto a las condiciones de ocurrencia de aguas subterráneas según Da Franca y Mente, 1996) materializada en el Mapa Hidrogeológico de América del Sur (Da Franca y Mente, 1996). A su vez cada provincia se divide en subprovincias, en función del comportamiento hidrogeológico de los materiales del subsuelo a nivel local, a una escala de mayor detalle (figura 4).

Se detallan en el mapa las productividades de los distintos acuíferos, divididas en función del caudal específico (q) de las perforaciones.

Provincia hidrogeológica Paranaense

La provincia hidrogeológica Paranaense se corresponde con la denominada geológicamente Cuenca Sedimentaria Norte a la que se agrega un alto del basamento cristalino denominado Isla Cristalina de Rivera (o Islas Cristalinas de Minas de Corrales y Vichadero). La cuenca sedimentaria, como ya fue explicitado, forma parte de la cuenca intracratónica Chaco-Paranaense formada por sedimentos con características variadas en cuanto a su comportamiento hidrogeológico a causa de sus diferencias litológicas. La misma ocupa la región noreste, centro-norte y noroeste de Uruguay, abarcando un área aproximada de 100.000 km². Dentro de esta provincia, se identifican las siguientes subprovincias (Figura 4).

Subprovincia Precámbrica de Minas de Corrales-Vichadero

El subsuelo del área ocupada por esta subprovincia (2.000 km²) está constituido por rocas del Basa-

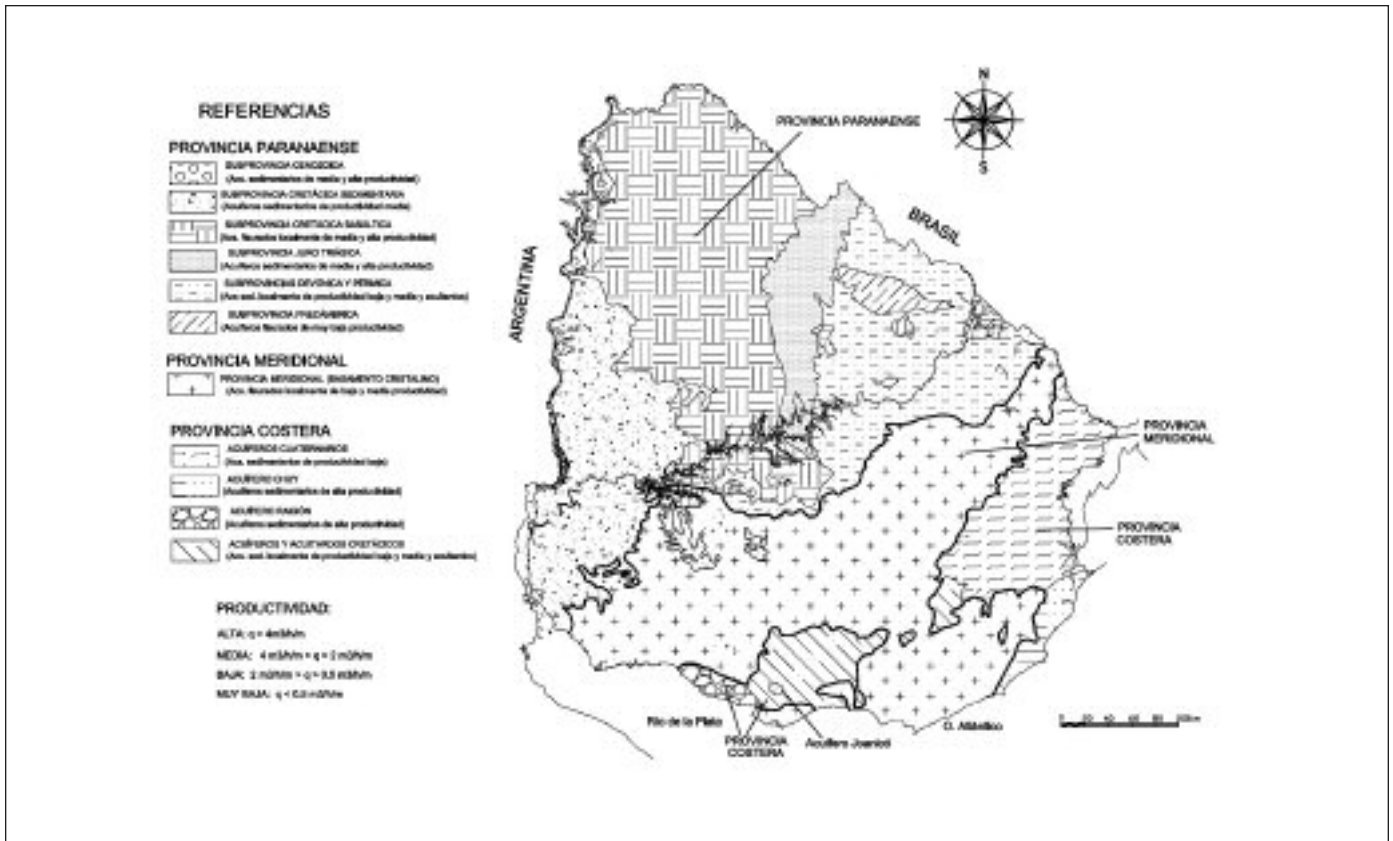


Fig. 4. Provincias hidrogeológicas del Uruguay
 Fig. 4. Hydrogeological provinces of Uruguay

mento Cristalino: rocas metamórficas de alto grado (ortogneises y paragneises, rocas máficas y ultramáficas metamorfizadas), rocas metamórficas de bajo grado de protolito sedimentario (metapelitas, cuarcitas, metareniscas), etc. En estas rocas el agua circula y se almacena en fracturas, diaclasas y planos de debilidad, que conforman acuíferos de tipo fisurado, en este caso de baja y muy baja productividad. Las perforaciones en el área de Minas de Corrales y Vichadero (departamento de Rivera) tienen profundidades 60 a 80 m, con caudales de 0,5 a 1 m³/h.

Subprovincia Devónica

Esta subprovincia está integrada por acuíferos porosos de media a baja productividad además de acuitardos y acuícluidos. En forma esquemática se puede establecer que los subsuelos de edad devónica del Uruguay identificados como acuíferos corresponden a niveles de las Formaciones Cerrezuelo y La Paloma. La Formación La Paloma presenta espesores reducidos y su extensión superficial es limitada, por lo que

su importancia hidrogeológica es menor. El acuífero devónico más importante está constituido por los niveles permeables de la Formación Cerrezuelo, que se corresponden con litologías constituidas por materiales arenosos finos, medios y gruesos y poco cementados con altas permeabilidades constituyendo un excelente acuífero.

Se pueden separar 3 situaciones de ocurrencia del acuífero Cerrezuelo, semiconfinado, confinado y ocasionalmente libre. Los parámetros hidráulicos del acuífero para las situaciones de semiconfinamiento y confinamiento, obtenidos a partir de análisis de ensayos de bombeo realizados por los autores se resumen en la Tabla 1.

La mayoría de las perforaciones que captan agua de este acuífero aportan caudales situados entre 1 y 5 m³/h. En cuanto a las profundidades la mayoría tienen menos de 60 m, y más de 100 m en situaciones de confinamiento.

La Formación Cordobés tiene, en función de su constitución arcillosa y arcillo limosa, un comportamiento asimilable al de un acuícluido u ocasionalmente al de un acuitardo.

	Cerrezuelo semiconfinado	Cerrezuelo confinado
T (m ² /día)	1-5.3	1.7
K (m/día)	0.1-0.26	0.11-0.12
S	1 x 10 ⁻³	1 x 10 ⁻⁴

Tabla 1. Parámetros hidráulicos del acuífero Cerrezuelo
 Table 1. Hydraulic parameters of the Cerrezuelo aquifer

Está constituida en su mayoría por sedimentos de muy baja permeabilidad, por lo que la posibilidad de obtención de agua subterránea de estos materiales se reduce a la construcción de pozos de gran diámetro (brocales), con los que se aumenta sensiblemente el almacenamiento y la recepción de agua en el pozo. Este tipo de construcciones presentan la desventaja de ser mucho más sensibles a las variaciones pluviométricas estacionales que los pozos semisurgentes, además de estar más expuestos a la contaminación.

Las profundidades de este tipo de pozos se sitúan entre 15 y 25 m, con diámetros de 1 a 2 m y caudales de 500 a 2.000 litros por día.

Subprovincia Pérmica

Se puede dividir esta subprovincia en tres unidades hidrogeológicas. En primer lugar, el conjunto formado por las Formaciones Acuíferas San Gregorio y Tres Islas, de las cuales la que presenta niveles con mayor permeabilidad es la Formación Tres Islas (Pérmico Inferior).

En la Tabla 2 se detallan los parámetros hidráulicos, determinados a partir del análisis de datos de ensayos de bombeo aplicando las metodologías de Theis y Jacob. Dichos ensayos fueron realizados por los autores en pozos que captan el acuífero Tres Islas en el E del país, donde se encuentra confinado por sedimentos pérmicos con espesores de hasta 60 m. La mayoría de las perforaciones que captan agua de este acuífero poroso en la zona centro este del país tienen profundidades situadas entre 40 y 80 m siendo los caudales obtenidos del orden de los 2 m³/h.

En la zona litoral oeste del Uruguay el acuífero conformado por los niveles permeables de San Gregorio y Tres Islas se encuentra confinado por espesores importantes de lavas de la Formación Arapey (450 m en Almirón) disminuyendo sensiblemente los espesores de sedimentos jurásicos permeables (Fms. Tacuarembó y Rivera) en relación al NO del Uruguay donde alcanzan potencias de más de 400 m.

Los pozos infrabasálticos en la zona centro oeste captan agua mayormente de los niveles permeables de Tres Islas y parte de San Gregorio; tal es el caso de la perforación de Almirón, con 930 m de profundidad, 40 m³/h de caudal (por bombeo), 43 m de profundidad del nivel de trabajo y 31°C de temperatura del agua. Los parámetros hidráulicos del acuífero obtenidos mediante análisis de ensayos de bombeo realizados por los autores en el pozo termal Almirón se resumen también en la Tabla 2.

La conductividad hidráulica (K) resultó similar para ambas zonas (E y O), la diferencia en el valor de transmisividad (T) se debe mayormente al aumento de espesor del acuífero en la zona de Almirón.

En segundo lugar se encuentra la unidad hidrogeológica conformada por la Formación Melo, constituida por materiales de edad Pérmico superior, de baja y muy baja permeabilidad, presentan importantes dificultades a los efectos de la captación de agua subterránea.

Además de la alternativa de construcción de pozos de gran diámetro, es importante destacar otro aspecto que pocas veces es tenido en cuenta en estas litologías. Al tratarse de materiales relativamente tenaces con un importante grado de litificación, el comportamiento desde el punto de vista hidrogeológico es en ocasiones asimilable al de un acuífero fisurado: aunque tengan un origen sedimentario, estas rocas presentan fracturas, fallas y planos de debilidad en las que el agua puede circular y ser almacenada, de manera similar que en las rocas del basamento cristalino o del basalto.

Esto cambia los criterios y métodos de prospección, que deben prestar atención en estos casos a la identificación de las estructuras potencialmente portadoras de agua y aplicar los mismos métodos de prospección de aguas subterráneas que se utiliza para acuíferos fisurados.

Finalmente, la tercer unidad hidrogeológica de la Subprovincia Pérmica es el Acuífero Yaguarí, que corresponde a la Formación del mismo nombre. Los niveles más permeables de la Formación Yaguarí

Acuífero		Zona E Confinado	Zona O Confinado
Método Theis	T (m ² /día)	12	78
	K (m/día)	0.9	0.7
	S	1.8 x 10 ⁻⁶	8.43 x 10 ⁻⁵
Método Cooper & Jacob	T (m ² /día)	11	68
	K (m/día)	0.8	0.64
	S	9.3 x 10 ⁻⁶	7.27 x 10 ⁻⁵

Tabla 2. Parámetros hidráulicos del acuífero Tres Islas
 Table 2. Hydraulic parameters of the Tres Islas aquifer

y Tres Islas. En la Figura 6 se muestra un corte geológico esquemático de N a S, desde Bella Unión hasta el pozo Paso Ullestie en Río Negro (ver ubicación del corte en Figura 5).

Todo este conjunto sedimentario se encuentra protegido por una extensa y potente capa basáltica que abarca 38.000 km² en Uruguay y alcanza más de 1.200 m de espesor. El resto del acuífero corresponde a la zona de afloramientos sedimentarios situados en la región centro-norte que ocupan aproximadamente 3.700 km².

De una forma general, se pueden caracterizar a las sedimentitas que constituyen el SAG por una sucesión de areniscas de origen continental, depositadas por sistemas fluviales y lacustres a las que se asocian varios episodios eólicos que se intercalan a lo largo de toda la sección. El espesor puede variar desde los pocos metros hasta más de 200 m totalmente saturados de agua.

Existe una gran variedad respecto a la geometría y composición del SAG tanto en la zona aflorante, como confinada que tiene su incidencia en las carac-

terísticas hidráulicas y en la calidad de las aguas subterráneas.

La zona aflorante ocupa un área de 3.700 km² en una faja de dirección SO-NO con un largo de 160km y un ancho medio de 35-40 km. En una zona reducida, al NO de esta faja, predominan los sedimentos de mayor macroporosidad con valores de transmisividad del orden de 150 m²/día, coeficiente de almacenamiento de 10⁻³, caudales específicos de 3 m³/h/m y caudales de 50 y 110 m³/h. Hacia el S-SE se desarrollan acuíferos con predominancia de litologías limo-arenosas con valores más bajos de transmisividad (5 a 30 m²/día) y caudales medios de 3,5 m³/h que cubren la demanda de pequeños tambos y casas individuales con áreas reducidas de riego (Montaño et al., 2005).

En la zona confinada las variaciones en el comportamiento del SAG se debe principalmente a la incidencia de fenómenos tectónicos en la geometría del mismo. La presencia de fallas, filones diabásicos, levantamientos, etc. compartimentan el sistema y condicionan el almacenamiento y circulación del

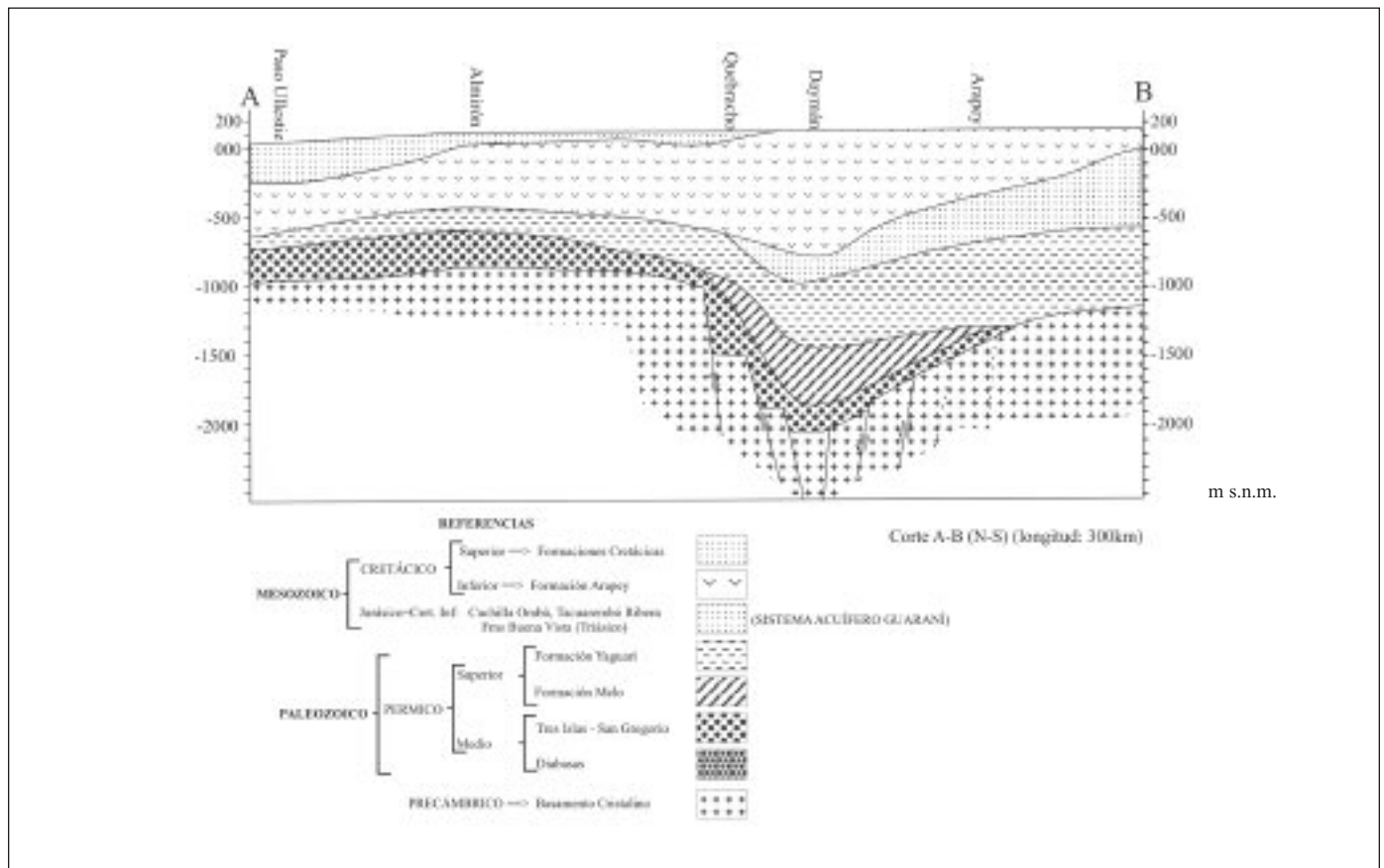


Fig. 6. Corte geológico N-S. Sistema Acuífero Guarani
 Fig. 6. Geological cross-section (N-S). Guarani aquifer system

agua subterránea marcando la gran heterogeneidad del sistema. Estas características determinan una gama de variaciones en las características hidráulicas que se reflejan en la transmisividad con valores 150 a 250 m²/día en la zona confinada (Montaño *et al.*, 2002). Existe una gran variación en el caudal de surgencia de los distintos pozos, presentando valores que van desde 30 a 300 m³/h.

Subprovincia Cretácica

Pueden distinguirse en esta subprovincia 2 unidades hidrogeológicas de importancia.

La primera de ellas está constituida por los basaltos de la Formación Arapey (Cretácico), que en la zona N-NO del país superan los 1.200 m de espesor y que constituyen, cuando se presentan alterados y fracturados de manera importante, acuíferos fisurados de media y alta productividad.

Estas rocas se comportan desde el punto de vista hidrogeológico como un acuífero fisurado, que en determinadas áreas (alrededores de la ciudad de Salto) adquiere una potencialidad muy alta, con perforaciones que erogan caudales superiores a los 60.000 l/h.

Puntualmente en esta última zona el caudal específico promedio de las perforaciones es del orden de 1,4 m³/h/m. La explotación de este acuífero fisurado se limita generalmente a las primeras coladas basálticas, situándose las profundidades medias de las perforaciones entre 40 y 50 m y alcanzando ocasionalmente profundidades de 60 a 80 m. Los niveles estáticos se sitúan entre 10 y 15 m de profundidad, los caudales más comunes son del orden de 5 a 15 m³/h. (Consur, 1995).

La segunda unidad hidrogeológica de esta subprovincia queda constituida por los sedimentos cretácicos permeables de las Formaciones Mercedes y Guichón, en conjunto o por separado según el punto geográfico considerado. La primera está constituida por arenas finas y medias, areniscas finas, gruesas y conglomerádicas de color predominantemente blancuzco a rosado, con cemento generalmente arcilloso y calcáreo con presencia de lentes calcáreos y limos arenosos que se comportan como acuitardos, semiconfinando en muchas ocasiones el acuífero o condicionándolo como acuífero multicapa. La Formación Guichón está constituida por areniscas conglomerádicas a pelíticas, de permeabilidad variable. El acuífero Cretácico se encuentra tanto semiconfinado como confinado y libre.

En la zona litoral O del Uruguay (Paysandú) los

parámetros hidráulicos de este acuífero son los siguientes (Tabla 3).

También existen sedimentos y rocas sedimentarias cretácicas al sur del país, aunque en condiciones geológicas algo distintas y en situaciones variables de espesor y potencialidad hidrogeológica, por lo que quedan incluidos dentro de la Provincia Hidrogeológica Costera.

Subprovincia Cenozoica

Los acuíferos cenozoicos en el Uruguay están representados dentro de la Provincia Hidrogeológica Paranaense, en la región litoral (O-NO del país), por el Acuífero Salto. Este acuífero está constituido por sedimentos arenosos a conglomerádicos de edad Pleistoceno pertenecientes a la Formación Salto. Se desarrolla en una franja de S a N de 15 a 20 km de ancho, groseramente paralela al Río Uruguay desde el S de la ciudad de Salto hasta Bella Unión en el departamento de Artigas. También se presenta al N de la Ciudad de Paysandú en la zona de la desembocadura del Río Queguay Grande. La formación Salto se encuentra aflorando en la costa del Río Uruguay en el Departamento de Río Negro pero no se comporta como acuífero.

La Formación Salto es un acuífero poroso y libre, con un espesor máximo de 30 m. La transmisividad que presenta es de 50 m²/día, con un coeficiente de almacenamiento de 0,20. El caudal específico es de 2,54 m³/h/m. Respecto a las reservas se estima que las de carácter permanente alcanzan un valor de 9,6 x 10⁸ m³ y las reservas explotables se sitúan próximas a 4,3 x 10⁷ m³/año (Consur, 1995).

Se trata de un acuífero poco explotado, debido a que tradicionalmente hasta hace poco tiempo en la región de Salto no se realizaba la construcción de pozos con filtro y prefiltro, optándose por anular la zona del acuífero y captar agua de acuíferos más profundos (Basaltos de la Formación Arapey). Los

Trasmisividad (T) (m ² /día)	5 a 100
Conductividad hidráulica (k) (m/día)	0.12
Coeficiente de almacenamiento (S)	10 ²
Gradiente hidráulico (i)	0.025
Caudal específico (q) (m ³ /h/m)	0.1 a 3.42
Caudal (Q) m ³ /h	15-25m ³ /h

Tabla 3. Parámetros Hidráulicos (Acuífero Mercedes) (Montaño *et al.*, 2004)

Table 3. Hydraulic parameters (Mercedes aquifer) (Montaño *et al.*, 2004)

caudales obtenidos con mayor frecuencia son entre 1 y 5 m³/h, reflejando la baja eficiencia de las obras por falta de la colocación de un adecuado filtro y pre-filtro.

Provincia Meridional

Se agrupan dentro de la Provincia Meridional todas las rocas precámbricas (excluyendo la Subprovincia Precámbrica incluida en la Provincia Paranaense), las cuales presentan un comportamiento heterogéneo desde el punto de vista hidrogeológico, constituyendo sistemas acuíferos fisurados, en los que el agua circula y se acumula principalmente en fracturas, fallas y planos de debilidad.

Se destaca que las características de estos sistemas no son las mismas para toda el área, sino que por el contrario son extremadamente cambiantes, y su caracterización debe realizarse localmente. La separación de esta Provincia Precámbrica se realiza a modo de simplificar la división y agrupar a todos los acuíferos (y también acuífugos) precámbricos.

Resulta difícil manejar valores de parámetros hidráulicos (trasmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento) genéricos para esta provincia, ya que estos parámetros fueron concebidos para sistemas homogéneos y continuos. Aunque se obtengan valores mediante la consideración de que a determinada escala existen en estos acuíferos fisurados condiciones de isotropía y homogeneidad, éstos datos serán puntuales y no extrapolables al resto del área.

Se resumen en la Tabla 4 las principales características de las perforaciones construidas en basamento cristalino en el área metropolitana de Montevideo, capital del Uruguay, situada al S del país.

Provincia Costera

En esta Provincia Hidrogeológica se incluyen acuíferos constituidos por formaciones geológicas desde cretácicas a cenozoicas. Se detallan, por ser los de mayor importancia, los de edad cenozoica, representados por el Sistema Acuífero Raigón y el Sistema

Acuífero Chuy y los acuíferos cretácicos sedimentarios constituidos por las Formaciones Mercedes y Migues (Sistema Acuífero Joanicó).

El comportamiento hidrogeológico de las Formaciones Mercedes y Migues es variable: existe un área donde constituyen un sistema acuífero de importante potencial, al que denominamos Sistema Acuífero Joanicó (Gagliardi y Montaño, 2003), por ser en los alrededores de la localidad de Joanicó (Canelones, centro sur del país) donde adquiere su mayor desarrollo. Fuera de esta zona la constitución y estructura de estas formaciones generan propiedades hidrogeológicas sumamente heterogéneas que condicionan su comportamiento como acuífero. El Sistema Acuífero Joanicó es del tipo multicapa. Los niveles permeables que lo constituyen corresponden a arenas finas a gruesas y mezcla de gravas y arenas, con presencia ocasional de matriz fina pertenecientes a las formaciones Mercedes y a la formación Migues y se sitúan aproximadamente entre 30 y 120 m de profundidad.

Este acuífero se comporta como semiconfinado en la mayor parte del área, estando su techo constituido por materiales cenozoicos con espesores de 10 a 50 m y su piso por materiales de baja permeabilidad que corresponden a la formación Migues. En el área de afloramiento de la formación Mercedes se encuentra a presión atmosférica, comportándose como un acuífero libre.

Las trasmisividad (T) media del acuífero se sitúa en el orden de los 50 m²/día con extremos de 3 y 100 m²/día; la permeabilidad media (K) de 1 a 10 m/día, el espesor medio (b) es de 10 m variando entre 3 y 26 m; los gradientes hidráulicos se sitúan en el orden de 0,0025. El coeficiente de almacenamiento es del orden de 10⁻³.

En el área de mayor desarrollo del acuífero Joanicó se obtienen los mayores caudales del departamento de Canelones: más del 25% de los pozos perforados extraen caudales mayores a 15 m³/h y más del 40% extraen caudales mayores de 10 m³/h. (Gagliardi y Montaño, 2003).

El Sistema Raigón, de alta productividad, constituye un acuífero sumamente importante porque representa la mayor reserva de agua subterránea del sur del país. Está estructurado como un conjunto sedimentario de edades Terciario-Cuaternario dispuestas en una antigua cuenca de sedimentación. Las Formaciones Camacho (Mioceno superior) y Fray Bentos (Oligoceno superior a Mioceno superior) conforman la base impermeable del acuífero: la primera en la parte sur del área de desarrollo del acuífero y la segunda en la parte norte. La formación Libertad (loess de edad Pleistoceno) constituye en

Profundidad (m)	Caudal (m ³ /h)	Nivel Estático (m)	Caudal específico (m ³ /h/m)
20-50	1-5	5-15	0.1-0.5

Tabla 4. Características de perforaciones en el Basamento Cristalino
Table 4. Characteristic of wells in the Crystalline Basement

gran parte del área el techo del acuífero, que abarca una importante extensión superficial (1.800 km²), semiconfinando a Raigón, con un espesor que varía entre 12 y 17 m.

El comportamiento hidrogeológico del acuífero Raigón es asimilable al de un acuífero semiconfinado. Los caudales de las perforaciones que lo captan son en general mayores a 20 m³/h y alcanzan ocasionalmente valores mayores a los 30 m³/h; las profundidades varían entre 30 y 40 m. La transmisividad (T) varía entre 300 a más de 600 m²/día, los coeficientes de almacenamiento son del orden de 2×10^{-4} a 3×10^{-2} (DNH *et al.*, 2005)

El Sistema Acuífero Chuy es un acuífero de alta productividad conformado por los niveles permeables de la Formación Chuy (areniscas medias y gruesas intercaladas con areniscas finas y pelitas arenosas) que en forma discontinua ocupa la costa este de Canelones (centro sur) hasta Rocha (sur este del país), departamento en el que adquiere su mayor desarrollo, siendo un recurso de suma importancia debido a que sus aguas presentan buena calidad físico química y los costos de extracción son bajos (pozos someros, con caudales específicos medios de 5 m³/h/m según Almagro *et al.*, 1998).

Estos autores establecen que el espesor máximo del acuífero es de 30 m, y que las permeabilidades (K) se sitúan entre 5 y 40 m/día. Indican a su vez que los caudales (Q) de las perforaciones que explotan esta unidad acuífera se sitúan entre 10 y 20 m³/día con caudales específicos (q) mayores a 4 m²/día y que la transmisividad (T) alcanza valores de 500 m²/día. Definen una recarga del 0,1% de las precipitaciones en las zonas de bañados y de hasta 9% de la precipitación anual en las zonas de dunas y arenales de la franja costera, ambas estimaciones para el departamento de Rocha, al SE del Uruguay. Las precipitaciones en el área oscilan entre 1.000 y 1.200 mm/año. El acuífero presenta comportamientos hidrogeológicos variables, desde libre a confinado.

Consideraciones cuantitativas del recurso

Los recursos hídricos subterráneos renovables o potenciales del Uruguay se pueden evaluar mediante una estimación de la recarga, entendiendo recarga neta como el volumen de agua que pasa a través de la zona no saturada, alcanzando al acuífero, durante un período específico de tiempo. La recarga se expresa usualmente como recarga anual neta (Feitosa y Manoel Filho, 1998).

La estimación de la recarga o infiltración profunda teórica se puede realizar en función del cálculo del

Balance Hídrico, teniendo en cuenta precipitaciones, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento superficial, capacidad de campo del suelo y coeficiente de marchitez permanente. La ecuación de balance hídrico obedece al principio de la conservación de la masa, o principio de continuidad, según el cual en un sistema cualquiera, la diferencia entre las entradas y las salidas es igual a la variación del almacenamiento dentro del sistema (Custodio y Llamas, 1986).

De una manera simplificada, el procedimiento para realizar el balance hídrico en una determinada cuenca hidrográfica es el siguiente: se realiza una estimación del escurrimiento superficial (Es) en la cuenca, restando el escurrimiento a la precipitación real (P) se obtiene la precipitación eficaz (Pef). Comparando la precipitación eficaz con la evapotranspiración potencial se identifican los momentos en que existe déficit hídrico y exceso de agua. La infiltración (I) o recarga se da en aquellos meses en los que la precipitación efectiva (Pef) es mayor que la evapotranspiración potencial ($Pef > ETP$), siendo igual a la diferencia entre estos dos parámetros ($I = Pef - ETP$). En los meses de déficit hídrico la precipitación efectiva es menor que la ETP, y la evapotranspiración real (ETR) es igual a la Pef, no existe exceso de agua y por lo tanto no hay infiltración. Los resultados pueden ser comprobados (ratificados y/o rectificadas) mediante piezómetros, midiendo el ascenso del nivel piezométrico luego de cada precipitación.

La dificultad en la solución de problemas prácticos radica principalmente en la incapacidad de medir o estimar con seguridad los distintos términos de la ecuación. Para estudios locales casi siempre se pueden realizar estimativas confiables, pero a nivel regional la cuantificación es en general grosera. En razón de que el cómputo de cada uno de los términos conlleva variadas estimaciones y mediciones, queda implícito un error.

De todas maneras, en función de distintas estimaciones de la recarga para diferentes zonas del Uruguay: Acuífero Raigón (DNH *et al.*, 2005); Sistema Acuífero Joanicó: (Gagliardi y Montaño, 2003); Acuífero Mercedes en Paysandú: (Montaño *et al.*, 2004); Acuífero Salto y Arapey (Consur, 1995), etc, se puede establecer de manera aproximada que la recarga en nuestro país se sitúa entre un 3 y un 6% de las precipitaciones reales ($P = 1.200$ mm/año), significando el escurrimiento entre 35 y 40% de P y la evapotranspiración entre un 55 y 60% de P (Figura 7).

Con una precipitación real promedio de 1.200 mm/año se estima que el volumen de recarga, y por lo tanto de recurso hídrico subterráneo renovable y en consecuencia teóricamente explotable, se sitúa entre $6,3 \times 10^9$ a $1,3 \times 10^{10}$ m³/año (Tabla 5).

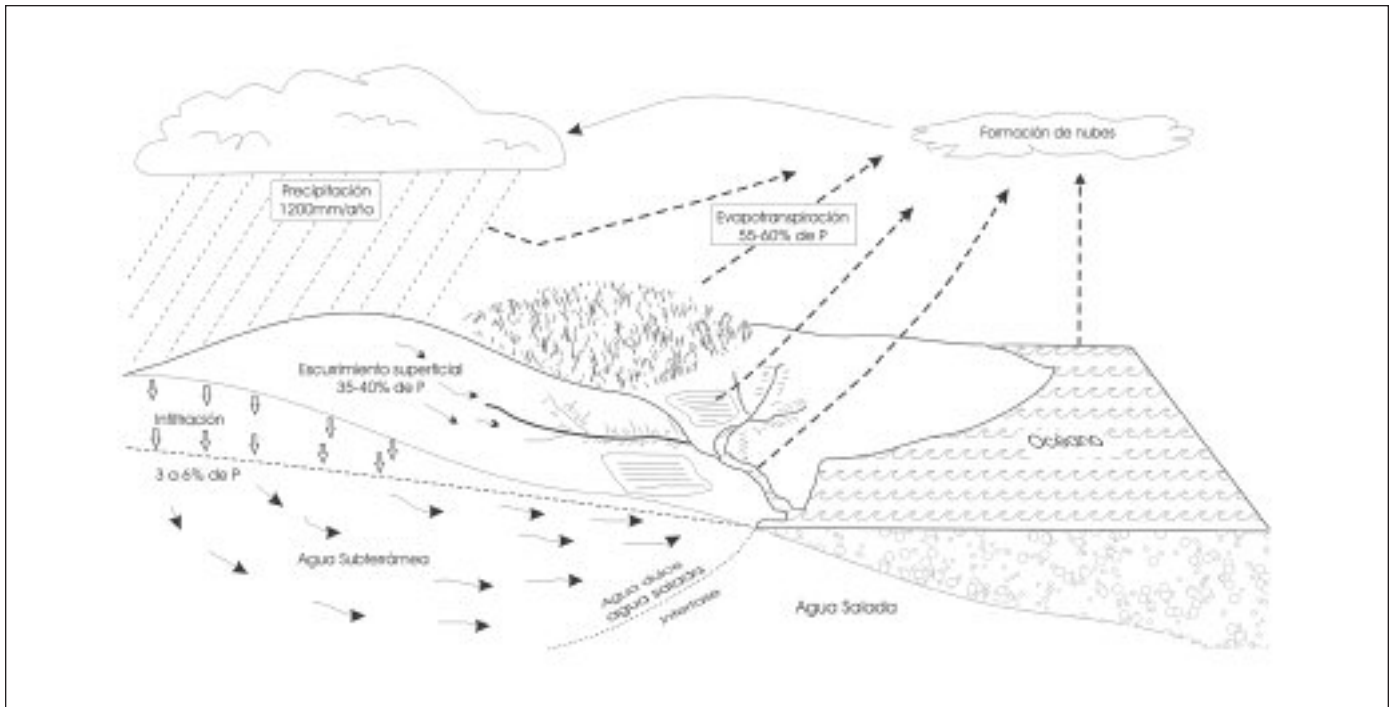


Fig. 7. Esquema simplificado de la recarga de los acuíferos de Uruguay
 Fig. 7. Simplified schema of the recharge in the aquifers of Uruguay

La calidad de las aguas subterráneas

En general las aguas subterráneas, salvo casos puntuales, no presentan problemas de calidad para consumo humano u otros usos. Los casos puntuales de problemas de calidad son tanto de origen natural como a partir de actividad urbana, agronómica e inducida (salinización) por sobreexplotación.

Respecto a la calidad de agua para abastecimiento público el Uruguay se rige por las normas de Obras Sanitarias del Estado (OSE) que se detallan en la Tabla 6.

La calidad natural de las aguas subterráneas en cada Provincia Hidrogeológica es en forma resumida la siguiente:

Provincia Meridional

Las aguas subterráneas extraídas en acuíferos de la Provincia Meridional (acuíferos fisurados, Basamento Cristalino) son clasificadas como bicarbonatadas sódicas, no presentan en general problemas de calidad, existiendo anomalías solamente en cuanto al contenido en sodio con rangos de 270 a 445 ppm en el Departamento de Montevideo (Montaño *et al.*, 2001). El pH se sitúa entre 7 y 7,3 con una conductividad de 750 $\mu\text{hos/cm}$; los valores de sólidos totales disueltos (STS) tienen una media de 600 ppm y el índice de salinización del suelo (SAR) es C3 S1 (Montaño, 1999).

En la zona suburbana de Montevideo existen plantaciones intensivas de hortalizas con anomalías en nitrato por exceso de fertilización nitrogenada con consecuencias de aguas no potables con valores entre 100 y 300 ppm de nitrato. Esta situación se presenta también en la región sur del país, identificada con la cuenca lechera, donde por un mal manejo de los pozos existen contaminaciones puntuales en perforaciones que abastecen establecimientos de producción de leche (tambos) con rangos que sobrepasan las 50 ppm de nitrato.

Provincia Costera

Dentro de la Provincia Costera, las aguas del acuífero

	mm/año	Volumen (m ³ /año)
Precipitación real (P)	1200	2.1 x 10 ¹¹
Escurrimiento (Es = 35-40% de P)	420-480	7.4 x 10 ¹⁰ 8.4 x 10 ¹⁰
Evapotranspiración (55-60% de P)	660-720	1.16 x 10 ¹¹ 1.27 x 10 ¹¹
Recarga (R = 3 a 6% de P)	36 72	6.3 x 10 ⁹ 1.27 x 10 ¹⁰

Tabla 5. Datos del balance hídrico
 Tabla 5. Water balance data

Parámetro	Valor máximo indicado	Influye
F ⁻	1,5 mg/l F ⁻	Sobre la salud
NO ₃ ⁻	45 mg/l NO ₃ ⁻	Sobre la salud
NO ₂ ⁻	1,5 mg/l NO ₂ ⁻	Sobre la salud
SO ₄ ⁼	400 mg/l SO ₄ ⁼	Calidad organoléptica
Al	0,5 mg/l Al	Calidad organoléptica
Cl ⁻	300 mg/l Cl ⁻	Calidad organoléptica
Fe	0,3 mg/l Fe	Calidad organoléptica
Na ⁺	200 mg/l Na ⁺	Calidad organoléptica
Dureza total	500 mg/l Ca CO ₃	Calidad organoléptica
Sólidos totales disueltos (STD)	1000 mg/l	Calidad organoléptica
Turbidez	5 NTU	Calidad organoléptica
Sabor y olor	No desagradables para la mayoría de los consumidores	Calidad organoléptica
Color	20 unidades en color verdadero	Calidad organoléptica
pH	6 a 9	Calidad organoléptica

Tabla 6. Valores límite máximos. Norma de Calidad de las Aguas Potables de OSE (1986)
 Table 6. Limit value. Quality norm of drinking water. OSE, (1986)

Raigón se clasifican como bicarbonatadas sódicas y (Figura 8), duras a muy duras, pero que no presentan problemas de potabilidad. La dureza total tiene una media de 160 ppm con extremos de 60 a 380 ppm de CaCO₃ (DNH *et al.*, 2005).

Las aguas del acuífero Chuy varían de bicarbonatadas sódicas a cloruradas sódicas, aunque ambos tipos encontrados se localizan sobre el límite de la clasificación por lo que su diferencia no es notable. Los contenidos de cloruros son del orden de los 120 mg/l, el pH medio es de 6,5 y la alcalinidad media de 130 mg/l en CO₃Ca (Almagro *et al.*, 1998), la dureza total no sobrepasa las 90 ppm, la conductividad eléctrica es de 590 umhos/cm con un residuo seco de 340 ppm. El riesgo de salinización (SAR) se clasifica como C2 S1.

En la región SE (Barra del Chuy) según Almagro *et al.* (1998) las perforaciones próximas a la costa y al Arroyo Chuy presentan indicios de intrusión marina, con concentraciones de cloruros en torno de los 700 mg/l.

Se destaca la presencia de anomalías en Fe que alcanza valores de 8 ppm en el balneario La Paloma (Rocha), inhabilita el uso de esta agua para abastecimiento público siendo el límite de 0,3 ppm de Fe.

En lo referente al Sistema Acuífero Joanicó, se resumen en la Tabla 7 algunos datos hidroquímicos promedio, a partir de una serie de 15 análisis químicos realizados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MGAP) en muestras obtenidas de pozos que captan este acuífero. Las aguas se clasifican en general como bicarbonatadas cálcicas (Figura 9), con una dureza media de 219 mg/l CaCO₃, alcalinidad de 224 mg/l CaCO₃ y Sólidos Totales Disueltos (TSD) de 265 mg/l. El pH promedio es de 6,5 y la conductividad eléctrica se sitúa en el orden de los 450 a 500 umhos/cm.

Provincia hidrogeológica Paranaense

En cuanto a la calidad química, las aguas de la sub-

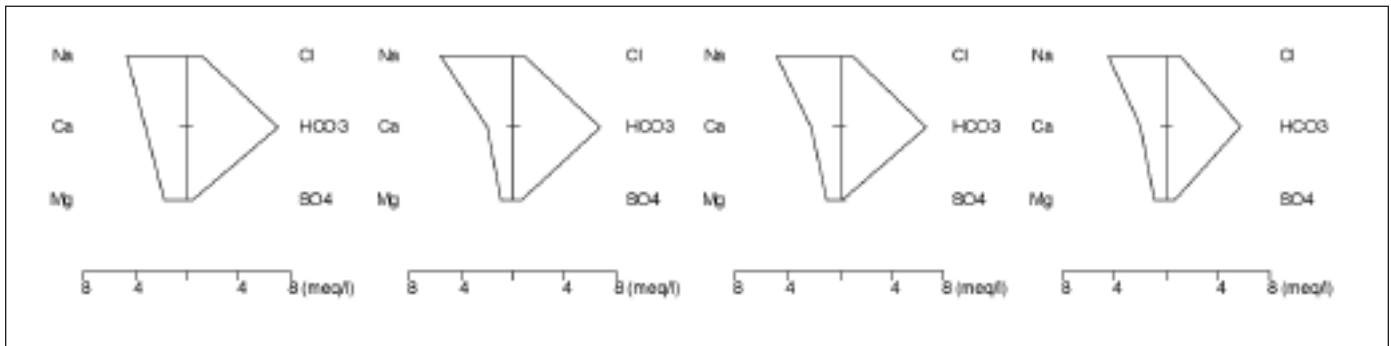


Fig. 8. Diagramas de Stiff. Acuífero Raigón
 Fig. 8. Stiff diagrams. Raigón aquifer

HCO ₃ ⁻ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l
273.3	70.5	10.45	1.5	4.0	5	5

Tabla 7. Composición media de las aguas del Sistema Acuífero Joanicó
 Table 7. Water composition. Joanicó aquifer system

provincia Precámbrica tienen similares características que las de la Provincia Hidrogeológica Meridional: son clasificadas como bicarbonatadas sódicas, no presentan en general problemas de calidad. El pH se sitúa entre 7 y 7,5 con una conductividad de 750 mhos/cm; los valores de sólidos totales disueltos (TSD) tienen una media de 600 ppm.

Las aguas de las unidades devónicas (Acuífero Cerrezuelo) desde el punto de vista de la potabilidad son en términos generales aceptables, aunque ocasionalmente presentan algunos parámetros que superan las normas de OSE (color, turbidez y Fe, valores límite indicados en Tabla 6). Se clasifican como bicarbonatadas, con alguna excepción de clorurada no pudiéndose indicar el catión preponderante. Presentan valores de dureza total menores a 50 mg/lCaCO₃, señalándolas como aguas blandas; solamente una muestra tomada en una perforación en la localidad de La Paloma (Durazno) presenta un valor de dureza de 220 mg/l CaCO₃, reflejando su carácter de agua dura a muy dura. Con respecto a la conductividad se sitúa en el orden de los 180 µS/cm. Esto estaría dando un riesgo bajo de salinización de los suelos (clase C1 del U.S. Salinity Laboratory Staff).

Sobre las aguas del acuífero La Paloma, presentan ocasionalmente problemas de potabilidad en cuanto al pH (5,8) y el contenido de hierro, que alcanza valores de 1,5 mg/l.

Dado que las perforaciones que captan agua de la unidad Tres Islas ocasionalmente lo hacen también de algún nivel permeable de San Gregorio es difícil obtener datos por separado de cada unidad, por lo que se consideran en conjunto para la parte hidrogeoquímica. De manera general las aguas presentan un único parámetro que sobrepasa la Norma de Calidad OSE (Tabla 6), es el anión fluoruro que presenta un tenor de 1,8 mg/l siendo el límite permitido de 1,5 mg/l de F⁻. Con respecto a la clasificación del agua para uso agrícola, se observó un peligro alto de salinización del suelo cayendo en el campo C3 de la clasificación del U.S. Salinity Laboratory Staff.

Para el caso de las muestras obtenidas en el departamento de Cerro Largo (centro este del país), la composición química analizada indica en la mayoría de los casos la calidad de no aceptable según las

Normas de OSE. En términos generales estas aguas son duras (entre 100 y 200 mg/l CaCO₃) a muy duras (valores mayores a 200 mg/l CaCO₃), sulfatadas-cloruradas; en donde, los parámetros Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, Fe, superan los máximos permitidos en la Norma. La conductividad presenta valores algo superiores a 4.000 µS/cm. Esta alta conductividad limita la aptitud de esta agua para riego siendo clasificada como de peligro muy alto a la salinización del suelo (clase C4 de la U.S. Salinity Laboratory Staff).

Las aguas del acuífero constituido por los niveles permeables de la Formación Yaguarí presentan valores de pH del orden de 7,2, la dureza es de 268 mg/l, la alcalinidad 355 mg/l, Cl⁻ 19 mg/l; NO₃⁻ 11 mg/l, conductividad 735 µS/cm y SO₄²⁻ 5mg/l (comunicación oral Pérez A, OSE).

El Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en el área aflorante presenta aguas bicarbonatadas cálcicas (Figura 10). Los valores de pH varían entre 5 y 7 con una media de 5,8; los sólidos totales disueltos (TSD) son del orden de 100 ppm y la conductividad media de 135 µmhos/cm a 25°C. La dureza total tiene una media de 60 ppm, la alcalinidad media es de 35 mg CaCO₃/l y los sólidos totales disueltos de 120 mg/l. Se destaca la mayor concentración de Ca²⁺ frente al Na⁺ y en algunos casos valores de Mg²⁺ semejantes o superiores al Na⁺.

En la Tabla 8 se resumen los valores medios de

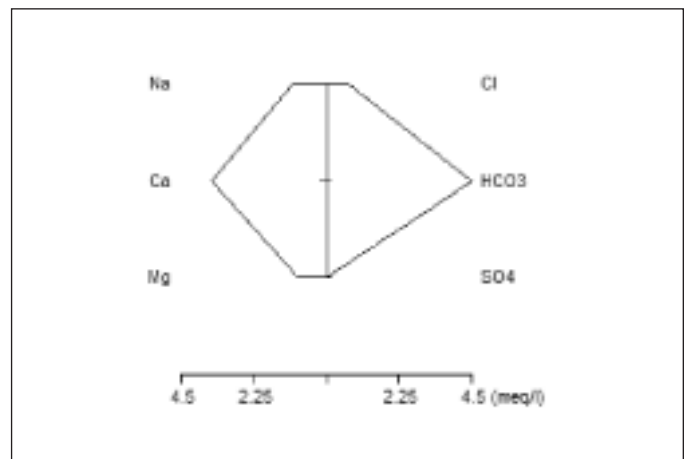


Fig. 9. Diagrama de Stiff. Acuífero Joanicó
 Fig. 9. Stiff diagram. Joanicó aquifer

HCO ₃ ⁻ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	Fe mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	SiO ₂ mg/l	F mg/l
48	15	4.8	1.9	4.7	0	5.4	5.3	6.5	31.1	0.1

Tabla 8. Composición de las aguas del acuífero Guaraní en el área aflorante
 Table 8. Water composition. Guaraní aquifer system-outcrop area

iones mayores más flúor y sílice para las aguas del acuífero Guaraní aflorante.

En el área confinada norte las aguas se clasifican como bicarbonatadas sódicas con una dureza total de 65 mg/l de carbonato cálcico, y cloruradas sódicas para el área confinada sur, con un valor medio de dureza de 200 ppm. La calidad de estas últimas las inhabilita para abastecimiento público, industrial y agrícola debido al alto contenido de sales, producto de la predominancia en la zona sur de sedimentos de origen marino de edad Pérmica (San Gregorio y Tres Islas) sobre los sedimentos eólicos y fluviolacustres del SAG típico, que disminuyen sensiblemente su espesor hacia el sur.

Las aguas de la subprovincia cretácica basáltica (Formación Arapey) se clasifican como bicarbonatadas cálcicas, duras a muy duras; la conductividad media registrada es de 540 µmhos/cm. El pH se sitúa entre 7 y 7,5. Los sólidos totales disueltos (TSD) se sitúan en 310 ppm (CONSUR, 1995). Existen anomalías puntuales de flúor (3,5 a 4 ppm) en el noroeste del país que determinan en estos casos la no potabilidad del agua. El origen del flúor puede deberse al enriquecimiento por el contacto del agua con las rocas basálticas, que contienen este elemento (Fraga 1992).

En las aguas del acuífero Mercedes (Cretácico) el anión más frecuente es el bicarbonato (HCO₃⁻); los

cationes que predominan son el calcio (Ca²⁺) debido a la gran proporción de cemento calcáreo y el sodio (Na⁺), respecto al potasio (K⁺) no sobrepasa los 6 ppm debido a participación en la conformación de arcillas. Las aguas se clasifican en su mayoría como bicarbonatadas cálcicas y ocasionalmente como bicarbonatadas sódicas (Figura 11).

Frecuentemente presentan rangos de dureza que las clasifican como duras y muy duras. Ocasionalmente tienen, en función de las normas de OSE (Tabla 6), una leve restricción respecto al cromo, elemento que se presenta en una concentración de 0,07 mg/l de Cr siendo el límite de potabilidad 0,05 mg/l (Fray Benos, Río Negro, centro oeste del Uruguay).

En cuanto a la subprovincia cenozoica, el acuífero Salto no presenta limitantes respecto a la calidad de sus aguas para uso en abastecimiento público (consumo humano) o riego, clasificadas como bicarbonatadas cálcicas. En la Tabla 9 se resumen los valores medios de algunos de los parámetros físico químicos más importantes.

Usos del agua

El agua subterránea en el Uruguay es utilizada mayormente para abastecimiento público y riego en diferentes emprendimientos agrícolas, y en menor medida para la actividad industrial. Detallaremos los usos en los dos primeros ítems.

El agua subterránea representa actualmente un 28% del total del agua suministrada por OSE, constituye la única fuente de alimentación para 73% de los servicios, y es parte del suministro para otro 12% de servicios.

Para analizar la aplicación y utilización del recurso hídrico subterráneo para riego nos centraremos en el análisis de las perforaciones construidas en el marco del proyecto PRENADER (Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego).

Este proyecto constituye un ejemplo de utilización del agua subterránea con fines de riego, con más de 1.400 pozos construidos en todo el país. Estas perforaciones, brindan un caudal "potencial" de aproximadamente 17.000 m³/h.

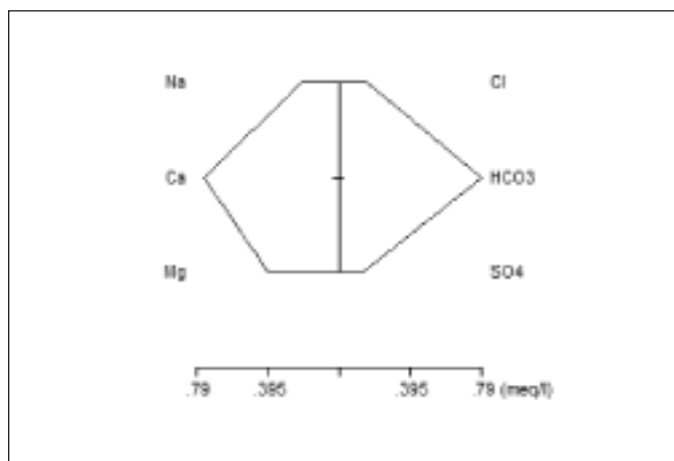


Fig. 10. Diagrama de Stiff. Acuífero Guaraní aflorante
 Fig. 10. Stiff diagram. Guaraní aquifer system-outcrop area

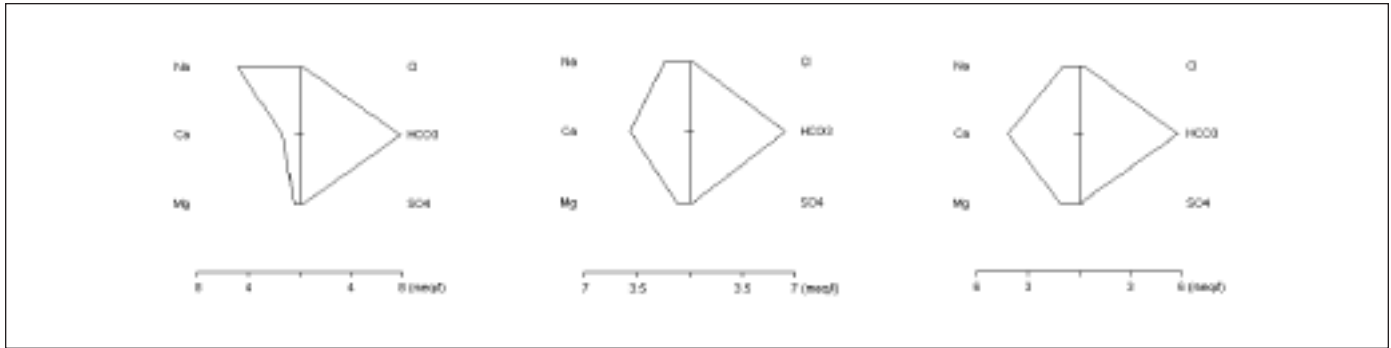


Fig. 11. Diagramas de Stiff para aguas del acuífero Mercedes
 Fig. 11. Stiff diagrams. Mercedes aquifer

Parámetro	Valor medio
PH	6,5 a 7,7
Conductividad eléctrica (CE) ($\mu\text{mhos/cm}$) (valores medidos y corregidos a 25°C)	332
Sólidos totales disueltos (STD) (ppm)	195
Dureza total (DT) (ppm)	210
Bicarbonatos (HCO_3) (ppm)	180

Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos. Acuífero Salto (Consur, 1995)
 Table 9. Physical-chemical parameters. Salto aquifer (Consur, 1995)

Como manera de visualizar la importancia y el valor del recurso hídrico subterráneo, utilizado en este caso para riego, se puede realizar la siguiente cuantificación:

Estimando el volumen de agua extraído para riego de los pozos construidos por PRENADER por año, en función de una tasa de bombeo de 15 horas diarias durante 4 meses al año (período de déficit hídrico) y para un costo del metro cúbico de agua de OSE (Tarifa Familiar 15-20 m^3/mes) de 0,50 €/m³; el valor en euros de este volumen es:

$$\text{Valor} = Q_{\text{total}} (\text{m}^3/\text{h}) \times 15 \text{ horas} \times 120 \text{ días} \times 0,50 \text{ €/m}^3$$

$$\text{Valor} = 17.000 \times 15 \times 120 \times 0,50 = 15.300.000 \text{ €/año}$$

Este valor de más de 15 millones de euros anuales podría duplicarse si se incluyen en el cálculo los pozos que no fueron realizados en el marco del proyecto PRENADER. Los valores son demostrativos de la importancia económica que tiene para el País el uso de este recurso como fuente de abastecimiento para el riego.

A los efectos de lograr una idea del grado de aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos en el Uruguay, se realiza en la tabla 10 una estimación del porcentaje del agua subterránea disponible utilizado en abastecimiento público por OSE y en riego mediante la explotación de los pozos de PRENADER.

Como ya fue mencionado anteriormente, se estima que el volumen de recarga, y por lo tanto de recurso hídrico subterráneo renovable, se sitúa entre $6,3 \times 10^9$ a $1,27 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{año}$. Con un volumen utilizado para abastecimiento del orden de $2,6 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{año}$ y para riego (pozos de PRENADER) del orden de $3 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{año}$ se estaría utilizando entre 0,44 y 0,9% de la recarga anual (Tabla 10).

El consumo de agua subterránea por parte de OSE y de las perforaciones de PRENADER no representa toda la explotación existente en el país, también existen numerosos pozos para abastecimientos domiciliarios, cría extensiva de ganado y producción de leche en el interior del País cuya extracción diaria es baja, con perforaciones que erogan un caudal diario que varía entre 1.000 y 20.000 l/h.

Surge claramente del análisis anterior que en Uruguay tanto el potencial de utilización del agua subterránea como el margen en volumen disponible son actualmente considerables. Debe destacarse que esta consideración general, tiene numerosas excepciones: en muchos lugares existen situaciones de sobreexplotación del recurso, que causó el agotamiento de pozos y zonas de acuífero debiéndose anular el abastecimiento con agua subterránea (Punta del Este, Punta Espinillo, Norte de la ciudad de Salto, Ciudad de Castillos, etc) además de grandes zonas donde los volúmenes de agua subterránea explotable son mínimos (por ejemplo áreas de dominio de sedimentos pérmicos grises y áreas del basamento cristalino constituidas por rocas metamórficas de grado bajo: filitas, etc).

Problemática actual y futura

En cuanto a los problemas actuales vinculados a las aguas subterráneas se pueden detallar los siguientes:

RECARGA	Volumen (m ³ /año)		% sobre la recarga	
	Mín (3% de P) 6.3 x 10 ⁹	Máx (6% P) 1.27 x 10 ¹⁰	Mín	Máx
ABASTECIMIENTO PÚBLICO (OSE año 2004, interior del país)		2.6 x 10 ⁷	0.42	0.2
RIEGO (PRENADER: tasa de bombeo: 15 horas/día durante 120 días/año)		3.0 x 10 ⁷	0.48	0.24
GASTO TOTAL		5.6 x 10 ⁷	0.9	0.44

Tabla 10. Gasto de agua subterránea en abastecimiento y riego
Table 10. Groundwater use in human supply and irrigation

- Sobreexplotación: Área Punta Espinillo (Montevideo): se trata de una zona de alta demanda para riego, en la que se explotan perforaciones en el Basamento Cristalino (acuífero fisurado). Se establece que existe sobreexplotación ya que se produce una extracción superior a la recarga hasta el punto de tener descenso significativo de los niveles piezométricos, lo que determinó la anulación de perforaciones. El área abarca unas pocas decenas de hectáreas pero tiene una importancia económica alta al tratarse de una zona de producción hortícola intensiva.
 - Sobreexplotación e intrusión salina: Área Punta del Este (Maldonado): hace unos años la demanda por abastecimiento público en este balneario era cubierta mediante perforaciones; el aumento desmedido de la explotación del agua subterránea llevó a una situación de sobreexplotación que indujo la intrusión de agua de mar al acuífero, con la consecuente pérdida del recurso.
 - Contaminación: los casos de contaminación son fundamentalmente de tipo puntual, generados por vertidos sanitarios, y sistemas de saneamiento precarios y defectuosos (fosas y pozos sépticos con vertedor hacia el suelo), actividad lechera (tambos) y ocasionalmente por agrotóxicos.
 - Calidad: existen casos puntuales de problemas de calidad natural de las aguas subterráneas (Figura 12).
 - El acuífero Chuy presenta altos contenidos de hierro y manganeso originados por ambientes reductores de antiguas albuferas.
 - También los acuíferos cretácicos del sur del país presentan ocasionalmente tenores altos de sales lo que implica algunos problemas para la utilización de sus aguas para riego. Además existen anomalías de arsénico en algunos lugares puntuales, cuyo origen puede deberse a los sedimentos modernos (Fm. Libertad), compuestos por coberturas que contienen cenizas volcánicas.
 - El acuífero fisurado conformado por los basaltos cretácicos presenta localmente anomalías de flúor (3 a 4 ppm) que sobrepasan los rangos de potabilidad, impidiendo en esos casos su utilización como fuente de abastecimiento público.
 - El acuífero Guaraní en su área confinada sur presenta altos contenidos salinos. En el área aflorante el SAG presenta anomalías de pH con valores < 6, que impiden su uso para abastecimiento público, riego e industria. El pH levemente ácido se debe a que el tiempo de transferencia de la recarga es pequeño al atravesar suelos arenosos ácidos y el acuífero al ser de origen desértico no aporta iones que puedan aumentar el pH, manteniéndolo bajo.
- A modo de síntesis, en la Tabla 11 se resumen las características fundamentales de las principales unidades hidrogeológicas descritas anteriormente.

Conclusiones

El 60% de los acuíferos del Uruguay son de tipo fisurado y en su mayoría de baja productividad. En áreas extensas la disponibilidad de agua subterránea es baja (por ejemplo áreas de dominio de sedimentos pérmicos grises). Esto indica que el Uruguay es un país de riqueza relativa respecto a las reservas explotables de agua subterránea. De todas maneras en la actualidad el gasto de aguas subterránea representa en todo el país, en una aproximación primaria, entre el 0,2 al 1% de la recarga.

Existen zonas con muy buena disponibilidad de agua subterránea como la sub provincia hidrogeológica Jurotriásica (Provincia Parananense) representada por el Sistema Acuífero Guaraní (SAG) principalmente en la zona confinada, con un área de 40.000 km² y con transmisividades medias de 150 m²/día, caudales surgentes mayores a 200 m³/h

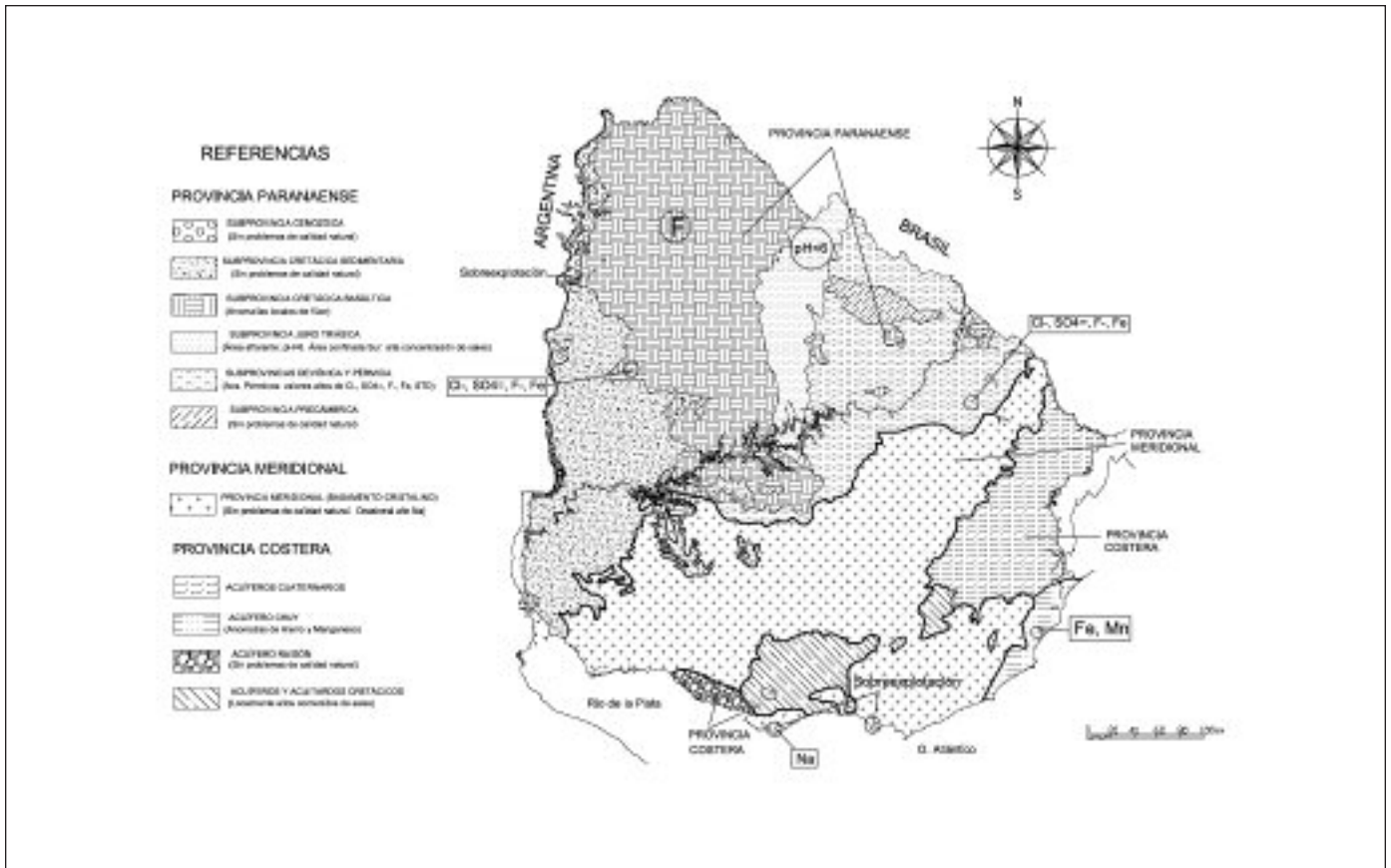


Fig. 12. Anomalías químicas naturales en Uruguay
 Fig. 12. Natural chemical anomalies in Uruguay

y anomalías de temperatura que puede alcanzar los 45°C. En el área aflorante del SAG, en zonas puntuales o restringidas se obtienen caudales mayores a 100 m³/h.

Además se distinguen, también en la Provincia Paranaense, los acuíferos de la subprovincia cretácica (acuíferos fisurados de origen basáltico) con caudales mayores a 60 m³/h. También existen acuíferos sedimentarios (Mercedes) con transmisividades de 100 m²/día y caudales de 90 m³/h.

En la provincia Hidrogeológica Costera se encuentran acuíferos con áreas restringidas como Raigón y Chuy, con altas transmisividades (300 a 500 m²/día) y caudales mayores a los 50 m³/día.

Respecto a la calidad existen limitantes naturales en acuíferos cretácicos (Basaltos) con valores de 4 ppm de flúor y en los acuíferos costeros con presencia de hierro con concentraciones de 5 a 8 ppm.

La actividad antrópica origina la presencia de nitrato con valores pro encima de la norma (45 ppm) causado por déficit de saneamiento en algunas loca-

lidades, fertilizaciones o mal proyecto y manejo de los pozos

En la zona costera existen zonas con salinización inducida de acuíferos por sobreexplotación.

La mayor demanda de agua coincide con las zonas de acuíferos fisurados, con menor disponibilidad de agua. Si esta situación persiste y se incrementa la actividad productiva, en un futuro cercano se generarán probablemente problemas de abastecimiento en estas áreas.

Se destaca que no existen en la mayor cantidad de casos planificación y racionalización del uso, así como fiscalización eficaz del cumplimiento de las normas vigentes. Esta es una de las obligaciones que a corto plazo deberán tomar los responsables de la gestión de los recursos hídricos subterráneos del País. Resulta vital también lograr un aumento del conocimiento cualitativo y cuantitativo de los recursos hídricos subterráneos, en función de lo cual se deberá elaborar una planificación y legislación por la cual se deberá regir la explotación del agua subterránea en el Uruguay.

Provincia Hidrogeológica	Subprovincia	Unidad Hidrogeológica	Formación geológica	Litología (Ar: arena; F: fina; M: media; G: gruesa)	Comportamiento Hidrogeológico	K (m/día)	T (m ² /día)	S	Productividad (Mb: muy baja; B: baja; M: media; A: alta)	PP (m) (*: pocos de gran diámetro)	Q (m ³ /h)	Clasificación	Anomalia
PARANBAENSE	PRE-CAMBRIKA	Acuífero fisurado	Isla Cristalina de Rivera	Rocas metamórficas de bajo y alto grado	Acuífero fisurado heterogéneo; acuífugo	s/d (sin datos)	s/d	s/d	B-Mb	60-80	0.5-1	bicarbonatada sódica	
	DEVONICA	Cerezo	Cerezo	Ar, F, M y G	Semiconfinado	0.1-0.26	1-5.3	10 ⁻⁵	s/d	40-60	1-5	bicarbonatada	
					confinado	0.11-0.12	1.7	10 ⁻⁴	s/d	>100			
		Condóbs	Condóbs	Lutitas, pelitas	Acuífero acuífugo	Muy baja	s/d	s/d	s/d	15-25*	0.02-0.08	s/d	
	La Paloma	La Paloma	Ar F y M micáceas	acuífero	baja	s/d	s/d	B		5	s/d	pH: 5.8; Fe (1.5mg/l)	
	PERMICA	Tres Islas – San Gregorio	Tres Islas – San Gregorio	areniscas, litas, diamictitas, síltitas	Confinado E	0.8-0.9	11-12	10 ⁻⁶	B	40-80	2	sulfatada clorurada	F (1-1.8ppm); Cl, SO ₄ , Fe
					Confinado W	0.6-0.7	70-80	10 ⁻⁵	M	800	40	clorurada sódica	Alto contenido en sales
		Melo	Melo	Pelitas, ar F y MF	acuífugo, acuífugo fisurado	Muy baja	s/d	s/d		10-25*	0.02-0.04		
	Yaguari	Yaguari	Ar F y MF, limolitas	Acuífero libre y semiconfinado	s/d	s/d	s/d	B	55-70	2			
	JURÓTRIASICA	Sistema Acuífero Guaraní	Buena Vista; Cuchilla del Ombú; Tacuarembó, Rivera	Depósitos eólicos y fluvioestuarios	(SAG aflorante) libre y semiconfinado		5-30 (ocasional: 150)	10 ⁻⁵	B-M	40-60	3.5	bicarbonatada cálcica	Bajo pH (<6)
					(SAG infraabsojico) confinado	0.5-0.7	150-250	10 ⁻⁴	M-A	1000-1200	30-300	bicarbonatada sódica	Temperatura (32-45°C), surgencia
	CRETÁCIKA	Acuífero basáltico	Arapey	Basaltos vacuolares, rastros y lapas	Acuífero fisurado	s/d	s/d	s/d	M-A	40-80	5-60	bicarbonatada cálcica	F (3-5ppm)
		Cretácico sedimentario	Mercedes Guichón	Ar F, M y G	Acuífero libre, semiconfinado y confinado	0.12	5-100	10 ⁻⁷	M-A	40-100	15-25	bicarbonatada cálcica	
Cenozoica	Salto	Salto	Ar M y G, gravas	libre	2.5	50	0.2	M-A	15-25	1-15	bicarbonatada sódica		
MERIDIONAL	Acuífero fisurado	Basamento Cristalino	Rocas ígneas y metamórficas	acuífero fisurado, acuífugo				Mb-B	20-50	1-5	Bicarbonatada sódica	Ocasional Na (270-445ppm)	
COSTERA	Raigón	Ar G	Raigón	semiconfinado	25-50	300-600	10 ⁻² -10 ⁻⁴	A	20-30	10-20	Bicarbonatada sódica		
	Chay	Ar M y G	Chay	Libre a confinado	14732	500		A		10-20	Bicarbonatada sódica o clorurada sódica	Cl (700ppm) Fe (8ppm)	
	Sistema acuífero Jeonico	Ar F, M, G; conglomerados, pelitas	Marcos y Migas	Semiconfinado, confinado	1-10	3-100	10 ⁻⁵	B-M	40-120	5-15	bicarbonatada cálcica		

Tabla 11. Características de las unidades hidrogeológicas del Uruguay
Table 11. Characteristic of the hydrogeological units of Uruguay

Referencias

- Almagro, L., Custodio, E., Rocha, L. y Abelenda, D. 1998. *Hidrogeología del acuífero superior de la Formación Chuy*. Memorias del 4º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Volúmen 1. pp 374-390 ALH-SUD. Montevideo, Uruguay.
- Bossi, J. y Umpierre, M. 1975. *Magmatismo mesozoico del Uruguay Río Grande del Sur: sus recursos minerales asociados y potenciales*. Anales Congreso Iberoamericano de Geología Económica Buenos Aires, vol. II, pp. 119-142.
- Bossi, J. y Navarro, R. 1991. *Geología del Uruguay*. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, 970 pp.
- Bossi, J., Ferrando, L., Montaña, J., Campal, N., Morales, H., Gancio, F., Schipilov, A., Piñeiro, D. y Sprechman, P. 1998. *Carta Geológica del Uruguay. Escala 1:500.000*. Edición Geoeditores SRL (CD-ROM).
- CONSUR consultores, 1995. *Estudio del Acuífero Salto*. Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego. MGAP-MTOP-Banco Mundial. Dirección Técnica: Montaño J. 265 pp.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1986. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona.
- Da Franca, N. y Mente, A. 1996. *Mapa Hidrogeológico de América del Sur. Escala 1:5.000.000*. Texto explicativo. Programa Hidrológico Internacional (PHI)-UNESCO. CPRM, Brasil.
- Da Rosa Filho, E.F., Hindi, E., Giusti, D., Nadal, C. y Montaño, J. 2001. *Distribuição do Geotermalismo na Bacia Sedimentar Do Paraná*. Revista Latinoamericana de Hidrogeología v1, n°1. pp: 67-74.
- De Santa Ana, H. 2004. *Análisis tectonoestratigráfico de las secuencias permotriásica y jurásica de la cuenca Chacoparanense Uruguay*. Tesis Doctoral. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociencias y Ciencias Exactas. Campus de Río Claro. 2004.
- Feitosa, F.A.C. y Manoel Filho, J. 1998. *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. 2ª Edição. Serviço Geológico do Brasil CPRM-Laboratorio de Hidrogeología da UFPE LABHID. Fortaleza. 389 p.
- Fraga C.G., 1992. *Origen de fluoreto en aguas subterráneas dos sistemas aquíferos botucatu e serra peral da bacia do parana*. Tese Doutorado. IGC Instituto de Geociencias. Sao Paulo, 1992. 178 pp.
- Gagliardi, S. y Montaño, M. 2003. *Caracterización Hidrogeológica del Área Sauce-Joanicó*. Trabajo final de Hidrogeología. FCIEN-UDELAR. 54pp. Inédito.
- Goso, C. y Perea, D. 2003. *El Cretácico post basáltico de la Cuenca Litoral del Río Uruguay: Geología y Paleontología*. pp 141-170 de Veroslavsky G; Ubilla M y Martínez S. (eds): *Cuencas Sedimentarias de Uruguay. Geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay.
- Heinzen, W., Velozo, C., Carrión, R., Cardozo, L., Madracho, H. y Massa, E. 1986. *Carta Hidrogeológica del Uruguay. Escala 1:2.000.000*. DINAMIGE.
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Elia, M., Pérez, M., Nagy, M., Collazo, P. y Decoud, P. 1998. *SAG-Acuíferos Regionales en América Latina-Capítulo Argentino Uruguayo*. Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión Nacional del Litoral. Santa Fé, Argentina, 217 pp.
- Montaño, J. 1999. *Caracterización y vulnerabilidad de Sistemas Hidrogeológicos Discontinuos. Cuenca del Arroyo Carrasco. Montevideo, Uruguay*. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 203 pp.
- Montaño, J., Guèrèquiz, R., Collazo, P. y Martínez, S. 2001. *Planificación para la recuperación en Sistemas Hidrogeológicos Discontinuos. Punta Espinillo-Uruguay*. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. N° 1. pp15-26. ISSN 1676-0099.
- Montaño, J., Ernani, F., Hindi, E., Cicalese, H., Montaño, M. y Gagliardi, S. 2002. *Importancia de las Estructuras Geológicas en el Modelo Conceptual del SAG Área Uruguay*. Revista da ABAS Numero 16. pp 111 a 119.
- Montaño, J., Gagliardi, S., Montaño, M. y Vidal, H. 2004. *Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Mercedes en el área metropolitana de la ciudad de Paysandú*. Revista Latinoamericana de Hidrogeología. N° 4. pp35-46. ISSN 1676-0099.
- Montaño, M. 2005. *Estudio Hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en los alrededores de la ciudad Tacuarembó*. Trabajo final de la Licenciatura en Geología. FCIEN-UDELAR. Inédito.
- Muzio, R. 2003. *El magmatismo mesozoico en Uruguay y sus recursos minerales*. pp 75-100 de Veroslavsky G; Ubilla M y Martínez S. (eds): *Cuencas Sedimentarias de Uruguay. Geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay.
- PRENADER. Banco de datos de las perforaciones del Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego.
- Preciozzi, F., Soturno, J., Heinzen, W. y Rossi, P. 1985. *Memoria explicativa de la carta Geológica del Uruguay a escala 1:50.000*. Dirección Nacional de Minería y Geología. Montevideo, 92 pp.
- DNH, OSE, FCIEN, DINATEN, DINAMIGE, 2005. *Proyecto Gestión Sostenible del Acuífero Raigón*. RLA/8/031-OIEA. Dirección Nacional de Hidrografía (DNH), Obras Sanitarias del Estado (OSE), Dirección Nacional de Geología y Minería (DINAMIGE), Facultad de Ciencias (FCIEN-UDELAR), Dirección Nacional de Tecnología Nuclear (DINATEN). Inédito.
- UNESCO, 1981. *Reunión De coordinadores subregionales para la elaboración del Mapa Hidrogeológico de América del Sur. Informe Final*. Quito, Ecuador, 21-24 de julio de 1981. ROSTLAC, Montevideo.
- Veroslavsky, G., De Santa Ana, H. y Rosello, E. 2003. *Depósitos del Jurásico y Cretácico Temprano de la Región Meridional del Uruguay. El Lineamiento Santa Lucía-Aiguá-Merín*. pp 115-140 de Veroslavsky G; Ubilla M y Martínez S. (eds): *Cuencas Sedimentarias de Uruguay. Geología, paleontología y recursos naturales. Mesozoico*. DIRAC, Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay.

Recibido: julio 2005.

Aceptado: noviembre 2005.