



Programa Marco para la gestión sostenible de los recursos hídricos de la Cuenca del Plata, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático

Programa Marco para gestão sustentável dos recursos hídricos da Bacia do Prata, considerando os efeitos decorrentes da variabilidade e mudanças do clima



Aguas subterráneas en la Cuenca del Plata



CIC
Cuenca del Plata


fmam
FONDO PARA EL MEDIO
AMBIENTE MUNDIAL

ONU 
medio ambiente
Programa de las Naciones
Unidas para el Medio Ambiente


OEA
Organización para la
América Oriental

Aguas Subterráneas en la Cuenca del Plata

Diciembre de 2016



Aguas Subterráneas en la Cuenca del Plata

Índice

11	Resumen ejecutivo
15	<i>Resumo executivo</i>
19	<i>Executive summary</i>
23	Capítulo 1: Introducción
25	Capítulo 2: Aguas subterráneas en la Cuenca del Plata – Generalidades
25	2.1 La Cuenca del Plata
28	2.1.1 Características físicas
29	2.1.2 Principales acuíferos por cuencas hidrográficas
32	2.1.3 Usos del agua subterránea en la Cuenca del Plata
38	2.1.4 Vulnerabilidad natural de los acuíferos a la contaminación
41	Capítulo 3: Actividades y productos generados por el Grupo Temático Aguas Subterráneas durante el desarrollo del Programa Marco
41	3.1 Antecedentes del Grupo Temático Aguas Subterráneas
43	3.2 Mapa hidrogeológico síntesis de la Cuenca del Plata
43	3.2.1 Elaboración del mapa hidrogeológico
45	3.2.2 Acuíferos transfronterizos
45	3.2.2.1 Sistema Acuífero Pantanal
47	3.2.2.2 Sistema Acuífero Agua Dulce
47	3.2.2.3 Sistema Acuífero Caiuá/Baurú-Acaray
48	3.2.2.4 Sistema Acuífero Aquidauana-Aquidabán
48	3.2.2.5 Sistema Acuífero Serra Geral (SASG)
49	3.2.2.6 Sistema Acuífero Guaraní (SAG)
49	3.2.2.7 Sistema Acuífero Permo-Carbonífero
56	3.3 Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño
56	3.3.1 Generalidades
57	3.3.2 Unidades hidrogeológicas de síntesis
57	3.3.2.1 Unidad I. Chaco Boreal. Centro Norte
57	3.3.2.2 Unidad II. Chaco Boreal.- Zona central y suroeste
59	3.3.2.3 Unidad III. Chaco Boreal este e interfluvios
61	3.3.2.4 Unidad IV. Planicie aluvial del río Paraguay
61	3.3.2.5 Unidad V. Sierras Subandinas, Pampeanas y Pedemonte
64	3.3.2.6 Unidad VI. Chaco Aluvial, Paleocanales y río Pilcomayo
67	3.3.2.7 Unidad VII. Abanico Aluvial del Intiyuro
68	3.3.2.8 Unidad VIII. Interfluvios
69	3.3.2.9 Unidad IX. Ambiente fluvial del río Bermejo
70	3.3.2.10 Unidad X. Alto chaqueño y abanicos aluviales

74	3.3.3 Resultados y conclusiones de la integración
75	3.3.4 Trabajos propuestos
77	3.4 Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Cuareim/Quaraí
77	3.4.1 Procedimientos, metodologías y conceptos
79	3.4.2 Unidades hidroestratigráficas
80	3.4.3 Dominio hidrogeológico fracturado
80	3.4.3.1 Unidad hidroestratigráfica Arapey/Serra Geral (UH-A/SG)
84	3.4.4 Dominio hidrogeológico poroso
84	3.4.4.1 Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatu (UH-R/B)
87	3.4.4.2 Unidad hidroestratigráfica Salto (Sistema Salto/Arapey)
88	3.4.4.3 Unidad hidroestratigráfica aluviones/coluviones
88	3.4.4.4 Unidad hidroestratigráfica Aluviones
89	3.4.5 Información complementaria del mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí
93	Capítulo 4: Lineamientos de utilización y protección de las aguas subterráneas en la Cuenca del Plata.
94	4.1 Uso sustentable del agua subterránea
94	4.1.1 Realización de estudios en áreas potencialmente críticas
95	4.1.2 Estudios de viabilidad de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en subcuencas con estrés hídrico
96	4.1.3 Estudio de seguridad hídrica en áreas piloto en el SAYTT
97	4.2 Protección
97	4.2.1 Fuentes potenciales de contaminación
99	4.2.2 Estrategias de protección
99	4.2.2.1 Escala regional
100	4.2.2.2. Escala local (municipal)
103	4.3 Implementación y fortalecimiento de las herramientas básicas de gestión
104	4.3.1 Red de monitoreo de pozos
104	4.3.2 Implementación de base de datos en plataforma web
104	4.3.3 Programa de comunicación social sobre las aguas subterráneas
105	4.3.4 Lineamientos para la cuenca del Cuareim/Quaraí
105	4.3.5 Recomendaciones generales
109	Referencias
113	Listado de Figuras
115	Listado de Tablas
117	Listado de Siglas y Acrónimos
119	Referencias Institucionales

Resumen ejecutivo

En el contexto del Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata en Relación con los Efectos de la Variabilidad y el Cambio Climático, se llevaron a cabo una serie de trabajos de diagnóstico acerca de las aguas subterráneas y sistemas acuíferos de la Cuenca, con el objetivo de aportar al desarrollo del Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) y del Programa de Acciones Estratégicas (PAE).

La expansión de las poblaciones urbana y rural en el área, asociada al incremento de las actividades agrícola e industrial, conllevó el aumento del uso de los recursos hídricos, particularmente de aquellos de origen subterráneo. Las características intrínsecas de los acuíferos, como la ocurrencia de unidades potencialmente productivas y la calidad de las aguas subterráneas, fueron centrales en este movimiento.

El trabajo del Grupo Temático Aguas Subterráneas se orientó a tres actividades principales: la actividad prioritaria del Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño (SAYTT), en la que participaron en forma directa Argentina, Bolivia y Paraguay, con los aportes de

los integrantes de los demás países; las relacionadas con los demás acuíferos transfronterizos seleccionados (Guaraní, Serra Geral, Bauru-Caiuá-Acaray, Pantanal); y los trabajos realizados en el marco del Proyecto Piloto Demostrativo de la Cuenca del río Cuareim/Quaraí. La implementación de las actividades contó con la participación de las entidades gestoras de recursos hídricos, los servicios geológicos y otras instituciones afines de los cinco países de la Cuenca del Plata.

Con relación a los acuíferos transfronterizos seleccionados, se realizó una recopilación de antecedentes y de datos de pozos y, en base a la información reunida, se realizaron varios talleres para elaborar un mapa hidrogeológico síntesis de toda la Cuenca del Plata a escala 1:2.500.000 y otros de cada acuífero a escala 1:1.000.000. El Servicio Geológico de Brasil (CPRM) se encargó de la integración del mapa síntesis final para toda la Cuenca y su metodología, concebida para planificar la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos en todo el Cono Sur, que además fue aplicada para el desarrollo de los mapas de los diferentes acuíferos. El

trabajo procuró ser lo más uniforme posible, de acuerdo con los patrones internacionales de cartografía hidrogeológica. Se utilizó el sistema de coordenadas geográficas y el datum WGS 1984, lo que permitió asegurar el mismo nivel de precisión en la localización de datos para cualquier punto del área mapeada.

Dentro del mapa principal, además de separar las unidades hidroestratigráficas por dominio y productividad, se presenta en forma gráfica información sobre pozos relevados en la Cuenca, indicando la ubicación de cada captación de agua subterránea, sus rangos de caudales y el acuífero del cual extraen agua. También se incluyeron las isolíneas de igual espesor de lava, que indican la profundidad de la parte superior del Sistema Acuífero Guaraní, así como dos mapas complementarios, uno de densidad de pozos y otro de volumen anual extraído de agua subterránea.

Los ocho acuíferos o sistemas acuíferos de extensión regional y transfronterizos cartografiados son:

- El Sistema Acuífero Pantanal, localizado en la sub-cuenca del río Paraguay, que abarca áreas de Brasil, Bolivia y Paraguay.
- El Sistema Acuífero Agua Dulce, parte de una cuenca hidrogeológica regional compartida por Paraguay y Bolivia, ubicado en la porción norte del Gran Chaco Paraguayo y del este de Bolivia.
- El Sistema Acuífero Caiuá/Baurú-Acaray, que se encuentra en la cuenca del río Paraná, en la región noroeste de Paraguay, al norte del Departamento de Canindeyú, en la frontera brasileña y próximo a los Estados de San Pablo, Paraná, Mato Grosso del Sur, Goiás y Minas Gerais.
- El Sistema Acuífero Aquidauana-Aquidabán, localizado en la cuenca del río Paraná, en territorios de Brasil y Paraguay. Se extiende del noreste al sudoeste, y una parte de su área de ocurrencia se sitúa en el área de protección del Pantanal.
- El Sistema Acuífero Serra Geral, que abarca todo el planalto paranaense y la región fronteriza de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay.
- El Sistema Acuífero Guaraní, que se extiende por gran parte de la Cuenca del Plata, desde la sub-cuenca sedimentaria del Paraná hasta el área de la cuenca del Chaco Paranaense.
- El Sistema Acuífero Permo-Carbonífero, localizado en la cuenca hidrográfica del río Uruguay. Aflora en la porción sur del Brasil y nordeste del Uruguay, entre las latitudes 52° y 56° W y 30° a 34° S, y continúa en superficie en la zona oriental de esas áreas.
- El Sistema Acuífero Yrendá-Toba Tarijeño, compartido por Argentina, Bolivia y Paraguay, en la región del Gran Chaco Sudamericano. Desde el inicio del Programa Marco, se lo estableció como prioritario, dado que constituye uno de los más importantes reservorios transfronterizos de agua dulce y subterránea de la Cuenca y uno de los más significativos en el continente sudamericano.

Las tareas relativas al SAYTT dentro del Programa Marco se iniciaron con la delimitación de su área de estudio y el armado de su mapa geológico preliminar. La integración de la cartografía hidrogeológica digital del SAYTT de Argentina, Bolivia y Paraguay se basó en la similitud de las características litoestratigráficas de superficie y en los parámetros hidrogeológicos obtenidos como

resultado de los censos y de los monitoreos hidrogeológicos e isotópicos efectuados por los tres países durante la ejecución del Programa Marco.

De esta forma, se definieron 10 unidades hidrogeológicas de relevancia, tomando en consideración que el SAYTT constituye un sistema conformado por complejos acuíferos de Edad Terciaria y Cuaternaria. Mientras que los primeros corresponden a depósitos del Mioceno Superior-Plioceno en el sector oeste del área de estudio, y a depósitos continentales del Oligoceno-Mioceno Medio en la zona geográfica del Chaco; los acuíferos cuaternarios se encuentran relacionados principalmente con abanicos aluviales de extensión regional, como los de los ríos Intiyuro, Pilcomayo, Bermejo, Salado y Dulce, y parte del paleoabanico del río Parapetí.

La calidad de las aguas es muy variable dentro del área de estudio, sin embargo, se detectó un problema de relevancia asociado al elevado contenido de arsénico presente en numerosos pozos en la región, por lo que se recomienda un muestreo extensivo y monitoreo de este elemento.

Con respecto a las tareas realizadas en el Proyecto Piloto Demostrativo Cuareim-Quaraí, el Grupo Aguas Subterráneas centró sus esfuerzos en la consolidación de un mapa geológico, que sirvió también como aporte a la construcción del mapa síntesis.

El mapa fue dividido según las características litoestructurales de las unidades geológicas, ya que estas condicionan la forma en que se almacena y transmite el agua subterránea. Se identificaron y separaron los dominios hidrogeológicos o unidades hidrolíticas en porosas y fracturadas, y dentro de estos se diferenciaron los acuíferos granulares de los

fracturados, que pueden ser homogéneos o presentar zonas con productividad diferente. A partir de esto, se definieron las unidades hidroestratigráficas como formaciones geológicas o partes de ellas que almacenan y transmiten agua subterránea de forma semejante y con la misma productividad en el orden de magnitud.

Finalmente, se presentan los lineamientos de utilización y protección de las aguas subterráneas en la Cuenca del Plata a ser considerados en futuras acciones incluidas en el PAE.

Se proponen tres lineamientos o directrices centrales, que consideran la gran extensión de la Cuenca del Plata y el actual nivel de conocimiento sobre los acuíferos:

- i. el uso sustentable de las aguas, basado en estudios específicos en áreas representativas, con vista a su control y con el fin de prevenir la sobreexplotación de pozos;
- ii. la protección de los acuíferos mediante acciones puntuales de protección de pozos y medidas preventivas de control del uso del suelo, así como a través de la zonificación de la vulnerabilidad y del riesgo de contaminación en áreas de recarga;
- iii. la implementación de instrumentos básicos de gestión, que comprenden una red de monitoreo de pozos y un banco de datos e informaciones asociadas a la cartografía de los acuíferos, en conjunto con un programa de comunicación social dirigido a los usuarios de aguas subterráneas y al público en general.

Las acciones sugeridas se implementarán de acuerdo al marco normativo e institucional de cada país integrante de la Cuenca del Plata.

Resumo executivo

No contexto do programa Marco para a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos da Bacia do Prata na Relação com os Efeitos da Variabilidade e da Mudança Climática, foi realizada uma série de trabalhos de diagnósticos sobre as águas subterrâneas e os sistemas aquíferos da Bacia, com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento da Análise Diagnóstico Transfronteiriço (ADT) e para o Programa de Ações Estratégicas (PAE).

A expansão das populações urbana e rural na região, associada ao aumento das atividades agrícola e industrial, levou ao aumento do uso dos recursos hídricos, particularmente aqueles de origem subterrânea. As características intrínsecas dos aquíferos, como o surgimento de unidades potencialmente produtivas e a qualidade das águas subterrâneas, foram centrais neste movimento.

O trabalho do Grupo Temático Águas Subterrâneas foi direcionado a três atividades principais: a atividade prioritária do sistema Aquífero Yrendá-Toba-Tarijeño (SAYTT), na qual participaram de forma direta Argentina, Bolívia e Paraguai, com os aportes dos integrantes dos demais

países; as relacionadas com os outros aquíferos transfronteiriços selecionados (Guaraní, Serra Geral, Bauru-Caiuá-Acaray, Pantanal); e os trabalhos realizados no marco do Projeto Piloto Demonstrativo da Bacia do rio Cuareim/Quaraí. A implementação das atividades contou com a participação das entidades gestoras dos recursos hídricos, os serviços geológicos e outras instituições afins dos cinco países integrantes da Bacia do Prata.

Com relação aos aquíferos transfronteiriços selecionados, foi realizada uma compilação dos antecedentes e dados dos poços e, com base na informação reunida, elaboradas oficinas para a confecção de um mapa hidrogeológico síntese de toda a Bacia do Prata a uma escala 1:2.500.000 e outro de cada aquífero a uma escala 1:1.000.000. O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) ficou encarregado de integrar o mapa síntese final para toda a Bacia e sua metodologia, concebida para planificar a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos em toda a Região Sul, que ainda foi aplicada para o desenvolvimento dos mapas dos diferentes aquíferos. O trabalho procurou ser o mais uniforme possível, de acordo com os padrões

internacionais de cartografia hidrogeológica. Foi utilizado o sistema de coordenadas geográficas e o datum WGS 1984, que permitiu assegurar o mesmo nível de precisão na localização de dados para qualquer ponto da área mapeada.

Dentro do mapa principal, além de separar as unidades hidroestratigráficas por domínio e produtividade, apresenta-se também, de forma gráfica, informação acerca dos poços relevados na Bacia, indicando a localização de cada captação de água subterrânea, seus intervalos de vazões e o aquífero do qual extraem água. Também foram incluídas as isolinhas de mesma espessura de lava, que indicam a profundidade da parte superior do Sistema Aquífero Guaraní, assim como dois mapas complementares, um de densidade de poços e outro de volume de água subterrânea extraída anualmente.

Os oito aquíferos ou sistemas aquíferos de extensão regional e transfronteiriços cartografados são:

- O Sistema Aquífero Pantanal, localizado na sub-bacia do rio Paraguai, que abrange regiões do Brasil, Bolívia e Paraguai.
- O Sistema Aquífero Agua Dulce, parte de uma bacia hidrogeológica regional compartilhada entre Paraguai e Bolívia, localizado na região norte do Gran Chaco Paraguai e do leste da Bolívia.
- O Sistema Aquífero Caiuá/Baurú-Acaray, localizado na região noroeste do Paraguai, ao norte do Departamento de Canindeyú, na fronteira brasileira e próximo aos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais.
- O Sistema Aquífero Aquidauana-Aquidabán, localizado na bacia do rio Paraná, nos territórios brasileiro e paraguaio. Estende-se do noroeste ao sudeste, e uma parte da sua zona de ocorrência está situada na área de proteção do Pantanal.
- O Sistema Aquífero Serra Geral, que abrange todo o planalto paranaense e a região fronteira da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai.
- O Sistema Aquífero Guaraní, que se estende por grande parte da Bacia do Plata, desde a sub-bacia sedimentaria do Paraná até a área da bacia do Chaco Paranaense.
- O Sistema Aquífero Permo-Carbonífero, localizado na bacia hidrográfica do rio Uruguai. Aflora na parcela sul do Brasil e nordeste do Uruguai, entre as latitudes 52° e 56° W e 30° a 34° S, e mantém-se na superfície na região oriental dessas áreas.
- O Sistema Aquífero Yrendá-Toba Tarijeño, compartilhado entre Argentina, Bolívia e Paraguai na região do Gran Chaco Sudamericano. Desde o início do Programa Marco, foi estabelecido como prioritário, dado que constitui um dos reservatórios transfronteiriços mais importantes de água doce e subterrânea da Bacia e um dos mais significativos no continente sul-americano.

As tarefas relacionadas com o SAYTT dentro do Programa Marco foram iniciadas com a delimitação da área de estudo e a confecção de um mapa geológico preliminar. A integração da cartografia hidrogeológica digital do SAYTT da Argentina, Bolívia e Paraguai foi baseada na semelhança das características litoestratigráficas da superfície e nos

parâmetros hidrogeológicos obtidos como resultados dos censos e dos monitoramentos hidrogeológicos e isotópicos efetuados pelos três países durante a execução do Programa Marco.

Desta forma, foram definidas 10 unidades hidrogeológicas de relevância, levando em consideração que o SAYTT constitui um sistema conformado pelos complexos aquíferos de Idade Terciária e Quaternária. Enquanto que os primeiros correspondem a depósitos continentais do Oligoceno-Mioceno Médio na zona geográfica do Chaco; os aquíferos quaternários encontram-se relacionados principalmente com os leques aluviais de extensão regional, como os dos rios Intiyuro, Pilcomayo, Bermejo, Salado e Dulce, e parte do paleoabânico do rio Parapet

A qualidade das águas é muita variável dentro da região de estudo, entretanto, foi detectado um problema de relevância associados ao elevado nível de arsênico presente em muitos poços da região, pelo qual se recomenda uma amostragem extensiva e monitoramento constante deste elemento.

Com relação às tarefas realizadas no Projeto Piloto Demonstrativo Cuareim-Quaraí, o Grupo Águas Subterráneas centralizou seus esforços na consolidação de um mapa geológico, que serviu também como aporte na construção do mapa síntese.

O mapa foi dividido segundo as características lito-estruturais das unidades geológicas, já que estas condicionam a forma em que se armazena e transmite a água subterrânea. Foram identificados e separados os domínios hidrogeológicos ou unidades

hidro-litológicas em porosas e fraturadas e, dentro destes, diferenciados os aquíferos granulares dos fraturados, que podem ser homogêneos ou apresentar zonas com produtividade diferente. A partir disso, foram definidas as unidades hidroestatigráficas como formações geológicas ou partes delas que armazenam e transmitem água subterrânea de forma similar e com a mesma produtividade na ordem de magnitude.

Finalmente, apresentam-se os alinhamentos ou diretrizes centrais, que consideram a grande extensão da Bacia do Prata e o atual nível de conhecimento sobre os aquíferos:

- i. O uso sustentável das águas, baseado nos estudos específicos em regiões representativas, visando o controle e a prevenção à sobre-exploração dos poços;
- ii. A proteção dos aquíferos mediante ações pontuais de proteção de poços e medidas preventivas de controle do uso do solo, assim como através da zonificação da vulnerabilidade e do risco de contaminação nas áreas de recarga;
- iii. A implementação de instrumentos básicos de gestão, que compreendam uma rede de monitoramentos de poços e um banco de dados de informações associadas a cartografia dos aquíferos, em conjunto com um programa de comunicação social direcionados aos usuários de águas subterráneas e ao público em geral.

As ações sugeridas serão implementadas de acordo com o marco normativo e institucional de cada país integrante da Bacia do Prata.

Executive summary

Within the context of the Framework Programme for the Sustainable Management of the Water Resources of the La Plata Basin, with Respect to the Effects of Climate Variability and Change, the groundwater and aquifer systems of the Basin were diagnosed in order to contribute to the development of the Transboundary Diagnosis Analysis (TDA) and the Strategic Action Programme (SAP).

The expansion of the urban and rural populations in the area, associated with the increase in the industrial and agricultural activities, led to an increase in the use of water resources, particularly those found underground. The intrinsic features of aquifers, such as the occurrence of potentially productive units and the quality of groundwater, were essential in this movement.

The work conducted by the Groundwater Thematic Group focused on three core activities: the priority activity of the Yrendá-Toba-Tarijeño Aquifer System (YTTS), with the direct participation of Argentina, Bolivia and Paraguay and the contributions of the other countries' members; those related to the other selected transboundary

aquifers (Guaraní, Serra Geral, Bauru-Caiuá-Acaray, Pantanal); and the work done within the framework of the Pilot Demonstration Project of the Cuareim/Quaraí River Basin. The activities were implemented with the participation of water resources management entities, geological services and other related institutions of the five La Plata Basin countries.

As regards the selected transboundary aquifers, data on wells was collected and, based on the gathered information, several workshops were held to produce a summary hydrogeological map of the entire La Plata Basin at a scale of 1:2,500,000 and others of each aquifer at a scale of 1:1,000,000. Brazil's Geological Survey (CPRM, for its acronym in Portuguese) was in charge of integrating the final summary map for the entire Basin and its methodology, conceived to plan the availability of groundwater resources in the Southern Cone, was also used to produce the maps of the different aquifers. Work was conducted in the most uniform possible way, according to the international guidelines of hydrogeological mapping. The geographic coordinate system and the

WGS 1984 datum were used, which made it possible to ensure the same level of accuracy in the location of data for any point of the mapped area.

Within the main map, besides separating the hydrostratigraphic units per domain and productivity, information on wells surveyed in the Basin is presented graphically, indicating the location of each groundwater abstraction source, their flow ranges and the aquifer from which water is taken. In addition, the isolines with the same lava thickness, which indicate the depth of the upper part of the Guaraní Aquifer System, were included as well as two supplementary maps: a well density map and an annual groundwater extraction volume map.

The eight mapped regional and transboundary aquifers or aquifer systems are:

- The Pantanal Aquifer System, located in the sub-basin of the Paraguay river, which encompasses areas of Brazil, Bolivia and Paraguay.
- The Freshwater Aquifer System, part of a regional hydrogeological basin shared by Paraguay and Bolivia, located in the northern portion of the Paraguayan Gran Chaco and eastern Bolivia.
- The Caiuá/Baurú-Acaray Aquifer System, located in the Paraná river basin, in the northeast region of Paraguay, to the north of the Department of Canindeyú in the Brazilian border area and near the States of São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás and Minas Gerais.
- The Aquidauana-Aquidabán Aquifer System, located in the Paraná river

basin, in territories of Brazil and Paraguay. It extends north to south and a part of its extent of occurrence is located in the Pantanal conservation area.

- The Serra Geral Aquifer System, which encompasses all the Paraná Plateau and the border region of Argentina, Brazil, Paraguay and Uruguay.
- The Guaraní Aquifer System, which extends over a large part of the La Plata Basin, from the sedimentary Paraná river sub-basin to the area of the Chaco-Paraná basin.
- The Permo-Carboniferous Aquifer System, located in the Uruguay river basin. It emerges in the south of Brazil and northeast of Uruguay, between latitudes 52° and 56° W and 30° to 34° S and continues at the ground surface in the eastern zone of these areas.
- The Yrendá-Toba-Tarijeño Aquifer System, shared by Argentina, Bolivia and Paraguay, in the region of the Gran Chaco Americano. It was given priority from the beginning of the Framework Programme since it is one of the most important transboundary freshwater and groundwater reservoirs in the Basin and one of the most significant ones in South America.

The SAYTT-related tasks within the Framework Programme started with delimiting its area of study and producing its preliminary geologic map. The integration of SAYTT's digital hydrogeological maps of Argentina, Bolivia and Paraguay was based on the similarity of the surface lithostratigraphic characteristics and the hydrogeological parameters obtained as a result of the hydrogeological and isotopic censuses

and monitoring conducted by the three countries during the execution of the Framework Programme.

As a result, 10 important hydrogeological units were identified, taking into account that the SAYTT is a system made up of complex Tertiary and Quaternary aquifers. The former belong to Late Miocene–Pliocene deposits in the western sector of the area of study and to continental Oligocen–Middle Miocene deposits in the geographic area of Chaco, whereas the Quaternary aquifers are mainly related to regional alluvial fans such as the Intiyuro, Pilcomayo, Bermejo, Salado and Dulce rivers, and part of the Parapeti river paleofan.

Water quality is highly varied within the area of study; however, an important problem associated with high arsenic content in several wells in the region was detected and therefore intensive sampling and monitoring of this element is recommended.

With respect to the tasks conducted in the Cuareim–Quaraí Pilot Demonstration Project, the Goundwater Group focused their efforts on producing a geologic map, which also contributed to the production of the summary map.

The map was divided according to the lithostructural characteristics of the geologic units since they affect the way groundwater is stored and transmitted. The hydrogeological domains or hydroli-thologic units were identified and divided into porous and fractured and, within these, granular aquifers were differentiated

from fractured ones which can be homogeneous or have zones with different productivity. From this, the hydrostratigraphic units were defined as geologic formations or part of them which store and transmit groundwater in a similar way and with the same productivity in the magnitude order.

Finally, the guidelines for the utilisation and conservation of groundwater in the La Plata Basin are presented so as to be considered in future actions included in the SAP.

Three core guidelines that take into account the large expanse of the La Plata Basin and the current level of knowledge on aquifers are proposed, namely:

- i. the sustainable use of groundwater, based on specific studies in representative areas, in order to control it and prevent the overexploitation of wells;
- ii. the protection of aquifers through specific well protection actions and preventive land use control measures, as well as through vulnerability and pollution risk zoning in recharge areas;
- iii. the implementation of basic management instruments that include a well monitoring network and a data base of information on aquifer mapping, together with a social communication programme targeted at groundwater users and the general public.

The suggested actions will be implemented according to the regulatory and institutional framework of each La Plata Basin country.

Capítulo 1:

Introducción

Este trabajo contiene un amplio diagnóstico acerca de las aguas subterráneas y sistemas acuíferos en la Cuenca del Plata, enteramente apoyado en la cartografía sistemática de los principales sistemas acuíferos transfronterizos, junto con una propuesta de marco conceptual y líneas específicas de acción para la gestión integrada de las aguas subterráneas en la Cuenca.

El primer capítulo brinda una visión general de los recursos hídricos subterráneos y las potencialidades relativas de los acuíferos en la Cuenca del Plata, representados en el Mapa Hidrogeológico Síntesis.

El segundo capítulo corresponde a la cartografía inédita, a escala 1:500.000, del SAYTT, situado en la región del Gran Chaco, con la descripción de sus potencialidades y restricciones, asociadas principalmente a problemas localizados de salinización de las aguas subterráneas.

El tercer capítulo describe, ya en mayor escala (1:250.000), la hidrogeología de la cuenca piloto Cuareim/Quaraí, en la frontera entre Brasil y Uruguay. Ésta ha dado lugar a

una experiencia práctica, binacional, de integración del conocimiento y de soporte a la gestión de los Sistemas Acuíferos Guaraní y Serra Geral/Arapey. Se trata de un área de explotación intensiva de aguas superficiales y subterráneas, donde los sistemas de decisión sobre asignación del agua están siendo testeados.

El cuarto capítulo presenta un marco conceptual de lineamientos de utilización y protección de las aguas subterráneas, comprendiendo el uso sustentable, la protección y la implantación efectiva de los instrumentos de gestión.

La obra representa un esfuerzo de integración del personal técnico y de instituciones especializadas de los cinco países de la Cuenca, constituyendo un aporte esencial para el Programa Marco. Su principal contribución ha sido la elaboración de una base georreferenciada de los principales sistemas acuíferos transfronterizos, que incorpora mapas hidrogeológicos sistemáticos y cartogramas temáticos de apoyo, disponible para la consulta del público interesado.

Capítulo 2:

Aguas subterráneas en la Cuenca del Plata. Generalidades

2.1 La Cuenca del Plata

La Cuenca del Río de la Plata se localiza en el cono sur de América y se extiende en el territorio de cinco países: Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay. Como se observa en la **Figura 2.1.1** está integrada por las subcuencas de los ríos Paraná, Paraguay, Uruguay y Río de la Plata.

De acuerdo a la división propuesta por Tuc-ci, 2004 (**Figura 2.1.2**), cada uno de los trechos de las principales subcuencas pueden ser subdivididos de la siguiente forma:

a. Paraguay:

- i. Alto Paraguay: dentro de Brasil hasta el río Apa
- ii. Medio: trecho en Paraguay
- iii. Bajo: Paraguay y Argentina

b. Paraná:

- i. Alto Paraná: dentro de Brasil
- ii. Medio: Paraguay y Argentina
- iii. Bajo: solamente en Argentina

Figura 2.1.1

Mapa general de la Cuenca del Plata



Fuente: Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata, Programa Marco 2015

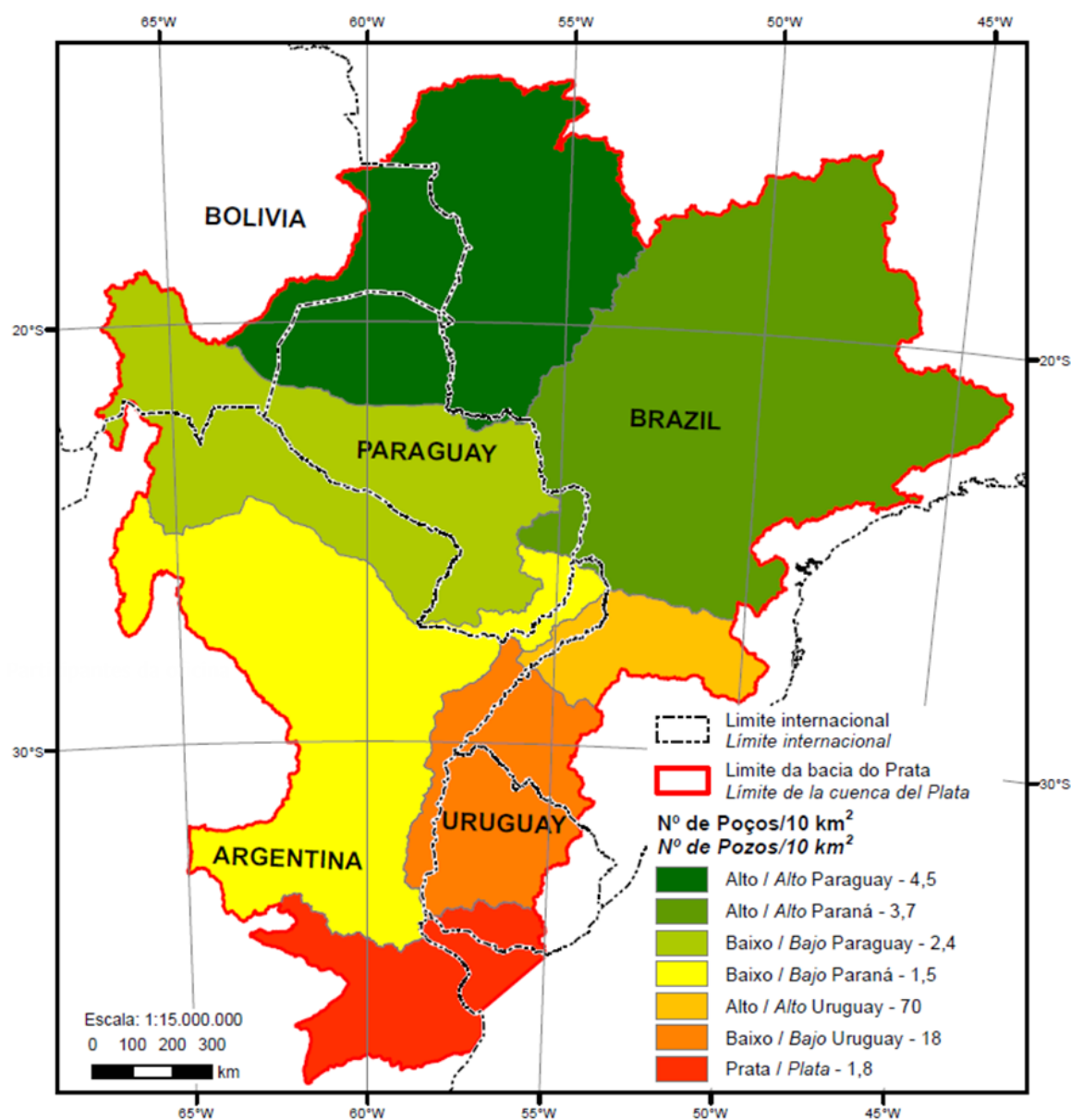
c. Uruguay:

- i. Alto Uruguay: en Brasil
- ii. Bajo: Uruguay y Argentina

d. Río de la Plata: después de la confluencia con Uruguay

Figura 2.1.2

Densidad de perforaciones para extracción de agua subterránea por subcuencas



Fuente: Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata, Programa Marco 2015

La Cuenca del Plata tiene una superficie aproximada de 3.1 millones de km², sólo superada en América del Sur por la cuenca Amazónica que cuenta con 6.11 millones de km² y es la tercera más grande del mundo. Posee una importancia fundamental para la economía de los cinco países de la región,

pues el 70% del PBI de estas naciones es generado en la Cuenca, en la que además se localiza aproximadamente el 50% de la población de las mismas.

En la Cuenca, se sitúan las cinco capitales de los países que la componen: Buenos Aires,

Tabla 2.1.1

Subcuencas hidrográficas y áreas de ocurrencia en los países de la Cuenca del Plata

Subcuenca	Área Subcuenca		Área Argentina		Área Bolivia		Área Brasil		Área Paraguay		Área Uruguay	
	(10 ³ km ²)	%	(10 ³ km ²)	%	(10 ³ km ²)	%	(10 ³ km ²)	%	(10 ³ km ²)	%	(10 ³ km ²)	%
Paraná	1510	48,7	565	37,5	0	0,0	890	59,0	55	3,5	0,0	0,0
Paraguay	1095	35,3	165	15,0	205	18,7	370	33,9	355	32,4	0,0	0,0
Uruguay	365	11,8	60	16,4	0	0,0	155	42,5	0	0,0	150,0	41,1
Plata	3100	100,0	920	29,7	205	6,6	1415	45,7	410	13,2	150,0	4,8

Montevideo, Asunción, Brasilia y Sucre, además de algunos de los más importantes centros urbanos de esas naciones (Tabla 2.1.1).

De acuerdo con los últimos relevamientos, la población total de la Cuenca es de 130.000.000 de habitantes, y engloba el 100% de la población paraguaya, el 87,64% de la de Uruguay, el 81,88% de Argentina, el 10% de la de Bolivia y el 53,98% de la de Brasil.

Con respecto a la economía en la región, son de gran importancia las actividades agropecuarias y mineras. La Cuenca se destaca por contar con una de las mayores producciones ganaderas del mundo y con extensas plantaciones de soja, mijo, arroz, algodón y caña de azúcar.

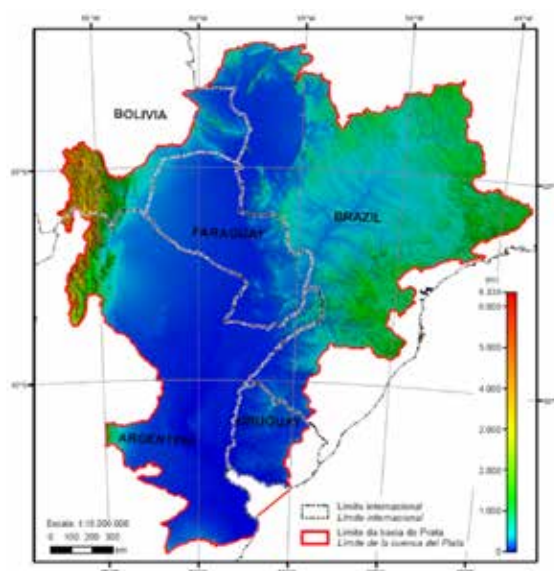
2.1.1 Características físicas

En el mapa de relieve mostrado en la Figura 2.1.1.1, se observa la predominancia de las planicies en el área de la Cuenca. En ese marco, se destacan dos estructuras principales, ocurrentes de norte a sur del área: al este, resalta el macizo de Mato Grosso y al noroeste, la planicie Chaco-pampeana, una vasta región de topografía casi plana.

En el extremo norte, se encuentran el Planalto brasileiro y la planicie amazónica, en el este los límites varían de las cabeceras del río San Francisco a la Serra do Mar, en el extremo oeste el límite es la Cordillera de los Andes, con cotas entre 1000 y 6000 m y finalmente, hacia el sur se hallan las pequeñas altitudes de las Sierras Gaúchas cuyas altitudes varían desde cotas superiores

Figura 2.1.1.1

Mapa de relieve



Fuente: Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata, Programa Marco 2015

a 1500 m en el extremo este hasta apenas 200 m en el sur.

Desde el punto de vista climático, las mayores lluvias coinciden con las nacientes de los ríos Paraguay, Paraná y Uruguay, mientras que disminuyen de norte a sur y de este a oeste (Figura 2.1.1.2).

Las temperaturas están influenciadas por la latitud y por el relieve y descienden también

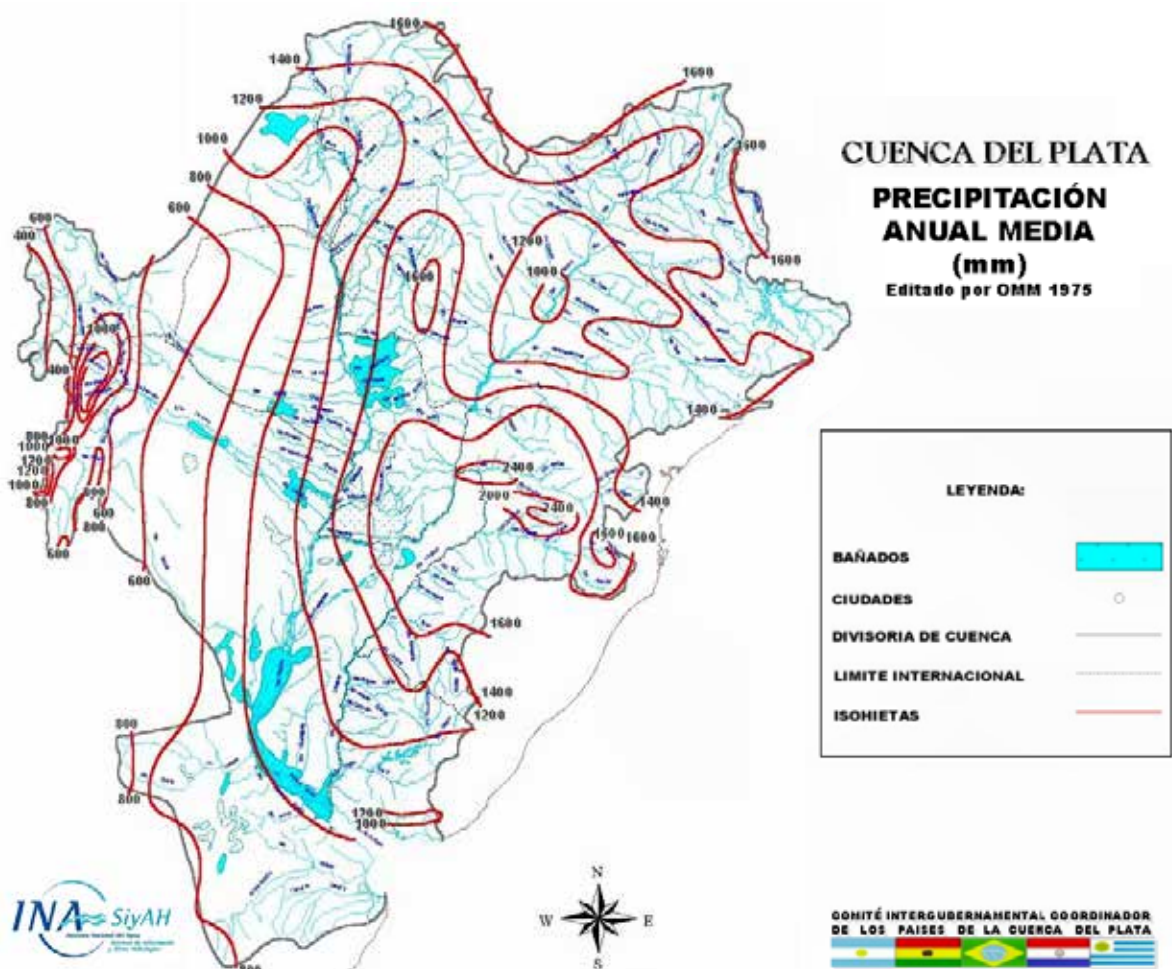
de norte a sur. En la mayor parte de la Cuenca, las temperaturas medias anuales son superiores a los 20°C.

2.1.2 Principales acuíferos por cuencas hidrográficas

En este apartado, se indican los principales acuíferos presentes en las diferentes sub-cuencas hidrográficas mostradas en la Figura 2.1.2 y se establece una categorización

Figura 2.1.1.2

Mapa de isoyetas



Fuente: OMM 1975

Tabla 2.1.2.1

Clases de acuíferos por productividad

Criterios de clasificación de acuíferos

Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Q (m ³ /h)	Clase	Productividad
≥ 4,0	≥ 10 ⁻⁰²	> 10 ⁻⁰⁴	≥ 100	(1)	Muy Alta: Suministro de agua de importancia regional (abastecimiento de ciudades y grandes irrigaciones). Acuífero que se destaca en el ámbito
2,0 ≤ Q/s < 4,0	10 ⁻⁰³ ≤ T < 10 ⁻⁰²	10 ⁻⁰⁵ ≤ K < 10 ⁻⁰⁴	50 ≤ Q < 100	(2)	Alta: Características semejantes a la clase anterior, sin embargo se sitúa dentro de la media nacional de buenos acuíferos.
1,0 ≤ Q/s < 2,0	10 ⁻⁰⁴ ≤ T < 10 ⁻⁰³	10 ⁻⁰⁶ ≤ K < 10 ⁻⁰⁵	25 ≤ Q < 50	(3)	Moderada: Suministro de agua para abastecimiento local, en pequeñas comunidades, uso para irrigación en zonas restringidas.
0,4 ≤ Q/s < 1,0	10 ⁻⁰⁵ ≤ T < 10 ⁻⁰⁴	10 ⁻⁰⁷ ≤ K < 10 ⁻⁰⁶	10 ≤ Q < 25	(4)	Generalmente baja, pero localmente moderadas: Abastecimiento de agua para satisfacer la oferta de consumo local o privada.
0,04 ≤ Q/s < 0,4	10 ⁻⁰⁶ ≤ T < 10 ⁻⁰⁵	10 ⁻⁰⁸ ≤ K < 10 ⁻⁰⁷	1 ≤ Q < 10	(5)	Por lo general muy baja, pero localmente baja: el suministro continuo de agua es apenas garantizado.
< 0,04	< 10 ⁻⁰⁶	< 10 ⁻⁰⁸	< 1,0	(6)	Poco Productivo o No Acuífero: suministro insignificante de agua. Suministro restringido al uso de bombas de mano..

respecto a su productividad, de acuerdo al criterio presentado en la **Tabla 2.1.2.1**.

a. Subcuenca del Alto Paraguay

En la subcuenca del Alto Paraguay, las principales unidades hidrogeológicas están representadas por los acuíferos FURNAS (D1f) y Botucatu (J3K1bt).

Los acuíferos FURNAS (Clases 2 y 3) y Botucatu (Clase 3) ocurren tanto de forma aflorante como confinada, con productividades que varían entre alta y moderada.

Las unidades Tarijeño (Qt) e Yrendá (Qy), componentes del Sistema Acuífero SAYTT y los depósitos de la Formación Pantanal (Qp), representan los acuíferos transfronterizos de la subcuenca. Las dos primeras ocupan territorios de Bolivia y Paraguay y la última penetra en áreas de Argentina, Bolivia y Paraguay. Todos presentan productividad muy baja, aunque en algunos lugares (a nivel local) ésta podría ser clasificada como de clase 5, de acuerdo con los datos disponibles.

Acuíferos fracturados y cársticos ocurren indistintamente, todos con bajas

productividades hidrogeológicas (generalmente de clase 4, aunque localmente pueden ser de clase 5 y 6). Se destaca, al nordeste de la subcuenca, el acuífero fracturado Cuiabá, que participa del abastecimiento de la ciudad homónima y de industrias de la región.

En las subcuencas del Medio y Bajo Paraguay se destacan, en términos de productividad y área de ocurrencia, extensos depósitos eólicos cuaternarios (Qp2 y Qe2), encuadrados en las clases de productividad 2 y 3, además de manchas aluvionales de clase 4 (aunque localmente de clase 5); la porción oeste-noroeste de la subcuenca se encuentra casi totalmente ocupada por acuíferos fracturados de clase 5.

En la región nordeste, existen rocas sedimentarias constituyentes del acuífero Misiones (Jm), componente del Sistema Acuífero Guaraní (SAG), compuesto por areniscas eólicas y encuadrado en la clase 3, además del acuífero fracturado Caacupé (Sc), constituido por areniscas silúricas con conglomerados basales, encuadrados en la clase 4, aunque localmente de clase 3.

b. Subcuenca del Paraná

En las subcuencas del Alto y Medio Paraná, se hallan rocas ígneas y metamórficas en sus porciones norte y noreste, que dan origen a acuíferos fracturados, principalmente de clase 5 y de forma localizada, de clase 4. En el resto de la subcuenca, predominan los sedimentos y lavas basálticas.

En esta zona, se destacan los acuíferos porosos Botucatu (J3K1bt) y Pirambóia (P3T1p), constituyentes del SAG, que varían entre las clases 1 y 3; el acuífero Bau-rú (K2b), de la clase 4 (aunque localmente, 3); y el acuífero fracturado Serra Geral

(K1_delta_sg), con productividades que oscilan entre las clases 3 y 5.

En la subcuenca del Bajo Paraná, predominan los depósitos recientes que constituyen acuíferos de productividades tipificables entre las clases 1 y 3, representados por las unidades Q1e, Qp y Q2e. Rocas fracturadas ocurren en los extremos NE (granitos, gneisses y migmatitas) y NW (basaltos tholeínicos), con productividades que varían entre las clases 4 y 5. En la porción central de la subcuenca, se extienden las unidades formadoras del SAG, siempre de forma confinada y encuadradas en la clase 1.

c. Subcuenca del Uruguay

El Sistema Acuífero Guaraní presenta un área de aproximadamente 840.000 km² en Brasil, de los cuales cerca del 90% se encuentran cubiertos por los basaltos de la Formación Serra Geral, que crean condiciones de confinamiento y artesianismo. Su espesor medio es de 250 m y cuenta con pozos de profundidad y productividad extremadamente variables. En los lugares confinados, el acuífero llega a ser explotado por pozos de más de 600 m de profundidad, que captan aguas de elevada temperatura (30 a 45° C).

En el Alto Uruguay, existe un predominio de rocas volcánicas que originan los acuíferos fracturados del Sistema Serra Geral, entre los cuales el SAG se encuentra predominantemente confinado. Una de las unidades constituyentes del SAG, el acuífero Botucatu (J3K1bt), ocurre por condicionantes topográficos en la forma de un no acuífero en esta región.

También pueden identificarse en la subcuenca, acuíferos porosos del Paleozoico encuadrados entre las clases 4 y 6,

representados por las unidades Passa Dois (P2T1pd), río Bonito (P1rb) e Itararé (C2P1i).

En la subcuenca del Bajo Uruguay, continúan predominando las rocas basálticas del acuífero Serra Geral (Brasil), llamado acuífero Arapey en territorio uruguayo, el cual no aflora en el lado argentino de la subcuenca. En términos de productividad, éste se sitúa en la clase 4 (aunque localmente 5).

En la porción argentina de la subcuenca, importantes depósitos eólicos y lacustres pleistocénicos (Q1e) constituyen acuíferos de clase 1, que conforman una importante reserva hídrica.

El SAG aparece en el área o de forma aflorante, representado por las formaciones Botucatú y Pirambóia del lado brasileiro, o bien de forma confinada, ocupando toda la región centro-norte del área. Sus productividades varían entre 1 (muy alta) y 5 (generalmente baja, aunque localmente muy baja).

Unidades no acuíferas ocurren de forma expresiva en Uruguay, representadas por las unidades Fray Bentos (Tfb), Libertad (Ql) y Grupo Melo (PIgm).

El Sistema Acuífero Serra Geral (de tipo fracturado) posee un espesor medio de 150 m y ocupa, principalmente, la porción sur de la región hidrográfica. Por su parte, el Sistema Acuífero Baurú-Caiuá posee un espesor medio de 200 m y recubre el Serra Geral, ocupando toda la porción central de la región hidrográfica con un área estimada en 315.000 km².

El Paleozoico está representado por los acuíferos del Grupo Passa Dois (Brasil) y Guichón-Mercedes (Uruguay), ambos de clase 5.

d. Subcuenca del Río de la Plata

Finalmente, en la subcuenca del Río de la Plata, los acuíferos están representados por los depósitos eólicos (Qe1) y eólicos-lacustres (Qe2), encuadrados respectivamente en las clases 1 y 2. No se encuentran en la zona otras unidades componentes del SAG ni tampoco las rocas volcánicas del Sistema Serra Geral.

2.1.3 Usos del agua subterránea en la Cuenca del Plata

El desarrollo de las poblaciones urbana y rural, asociado al fuerte incremento de las actividades agrícola e industrial, ha incrementado el uso de los recursos hídricos, particularmente de aquellos de origen subterráneo.

Este crecimiento, como era de esperar, se debe no sólo a parámetros demográficos, sino también a características intrínsecas de los acuíferos, como la ocurrencia de unidades potencialmente productivas y la calidad de las aguas subterráneas.

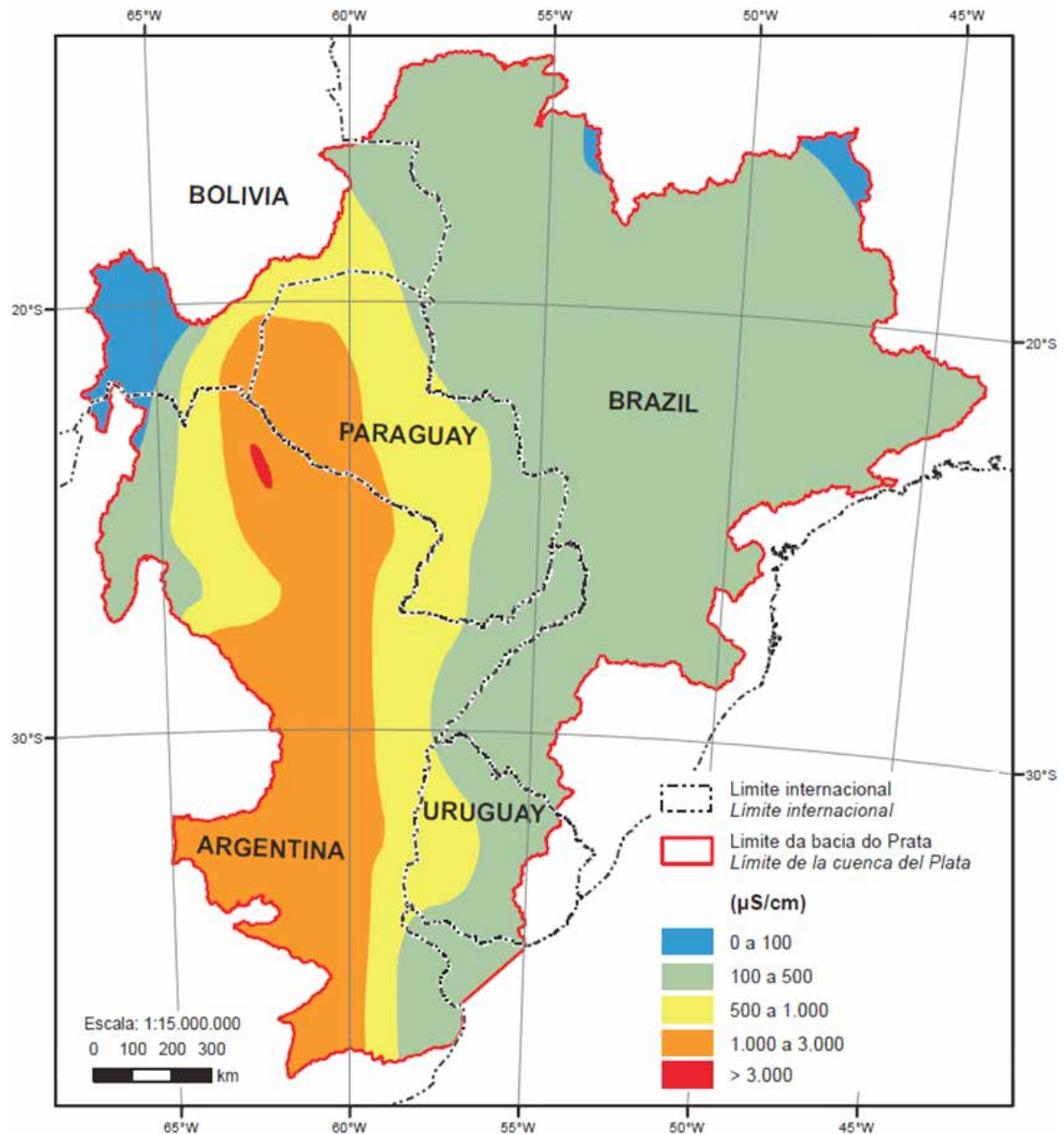
Dado que la concentración de sales es un importante parámetro de la potabilidad del agua, se determinó la conductividad eléctrica como parámetro asociado a la misma.

Las concentraciones de sales, expresadas en $\mu\text{S/cm}$, dispuestas en intervalos regulares distribuidos por toda el área de la Cuenca, presentan los siguientes resultados:

- 0 – 100 $\mu\text{S/cm}$ – registrados apenas en las regiones norte (en territorio brasileño) y noroeste de la Cuenca, en Bolivia.
- 100 – 500 $\mu\text{S/cm}$ – predominan ampliamente en toda la Cuenca, principalmente en la subcuenca del Paraná.

Tabla 2.1.3.1

Distribución de salinidades de las aguas subterráneas



Fuente: Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata, Programa Marco 2015

- 500 – 1000 µS/cm – este intervalo ocurre como dos fajas alineadas de dirección norte-sur, que separan la subcuenca del Paraná de aquellas situadas más al

oeste de la región y se extienden también en parte del territorio boliviano, el área del Pantanal brasileño y el territorio argentino.

- 1000 – 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – este intervalo de concentración, que marca el inicio de la ocurrencia de aguas con calidad no apta para consumo humano, se dispone en el Chaco argentino y paraguayo, además de la porción central de Argentina.
- 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – el área de ocurrencia de este intervalo de aguas de alta concentración de sales se restringe a una pequeña área de Argentina, correspondiente a una fracción del acuífero SAYTT.

En la **Figura 2.1.3.1**, se representa la distribución geográfica de ocurrencia de estos intervalos.

Como consecuencia de esta conjunción de factores (aspectos demográficos, ocurrencia de unidades acuíferas y calidad química de las aguas), las perforaciones de pozos se distribuyen de forma bastante compartimentada en la Cuenca, tal como puede verse en la **Figura 2.1.2**.

En la subcuenca del Bajo Paraná, se observa la menor densidad de pozos del área, con apenas 1,5 pozos/10 km^2 , que se corresponden con la baja densidad demográfica y la exuberancia hídrica superficial del área de la Mesopotamia argentina.

Por su parte, la subcuenca del Río de la Plata, también con buena ocurrencia de aguas de superficie, presenta 1,8 pozos/10 km^2 .

En la subcuenca del Alto Paraná, aunque existan 3,7 pozos/10 km^2 , este valor es consecuencia de su gran área de ocurrencia (que abarca parte del centro-oeste del Brasil), de su pequeña densidad poblacional y de su amplia riqueza en aguas de superficie. En esta área se sitúa también el estado de San Pablo, el mayor consumidor de aguas subterráneas de Brasil.

Las subcuencas del Alto y Bajo Paraguay (**Figura 2.1.2**), se localizan en la Amazonia brasileña y en áreas del Gran Chaco de América del Sur respectivamente y comprenden áreas de Bolivia, Paraguay y Argentina. Éstas muestran densidades de pozos que varían entre 2,4 y 4,5 pozos/10 km^2 . Además de la baja densidad poblacional, dada la ocurrencia de áreas de mayor salinización, se ve inhibido el incremento de las perforaciones en la zona.

Las subcuencas del Alto y Bajo Uruguay muestran los valores más elevados de densidad de pozos, que oscilan entre 18 y 70 pozos/10 km^2 .

En Argentina, las zonas con mayor utilización de agua subterránea para abastecimiento humano se sitúan en las proximidades de Buenos Aires, mientras que su uso en la actividad agropecuaria está generalizado en todo el país, con excepción de algunos sectores próximos a la Cordillera de los Andes.

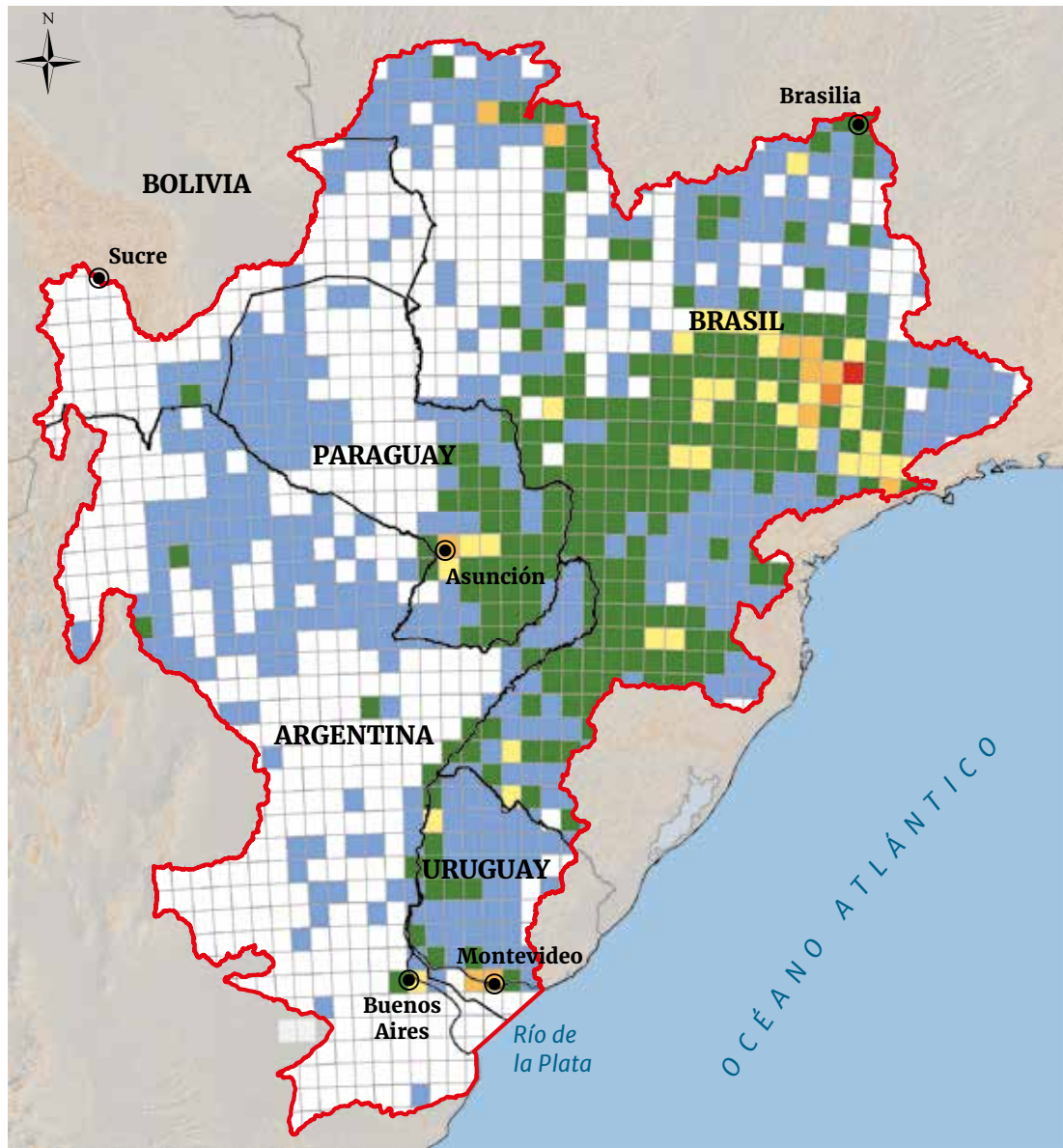
En Bolivia, los principales usos del agua subterránea están asociados al abastecimiento público, la agricultura y la industria.

En Brasil, este recurso tiene una importancia fundamental para el abastecimiento humano y para uso industrial en toda la región sudeste y sur. En esta zona tiene lugar la mayor explotación de aguas subterráneas de toda la Cuenca del Plata.

También en Paraguay el agua subterránea es ampliamente utilizada para abastecimiento humano e industrial, en los alrededores de su capital, Asunción. En otras regiones se la destina principalmente a la ganadería y al abastecimiento público de localidades dispersas.

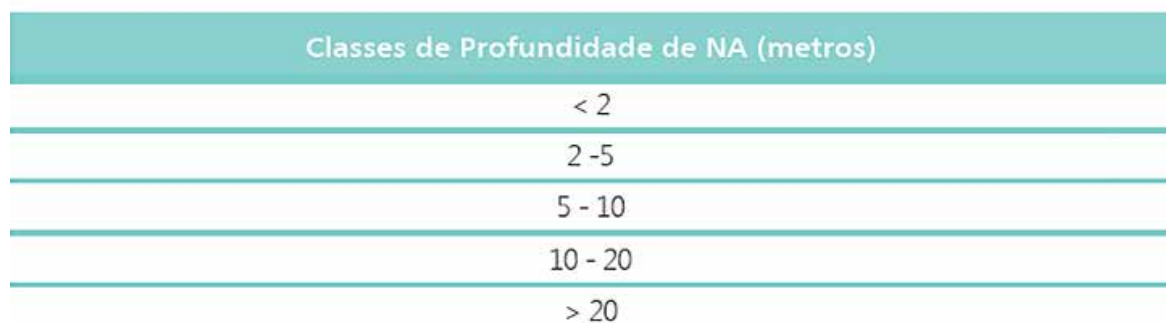
Figura 2.1.3.2

Volúmenes anuales explotados de aguas subterráneas



Fuente: Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata, Programa Marco 2015

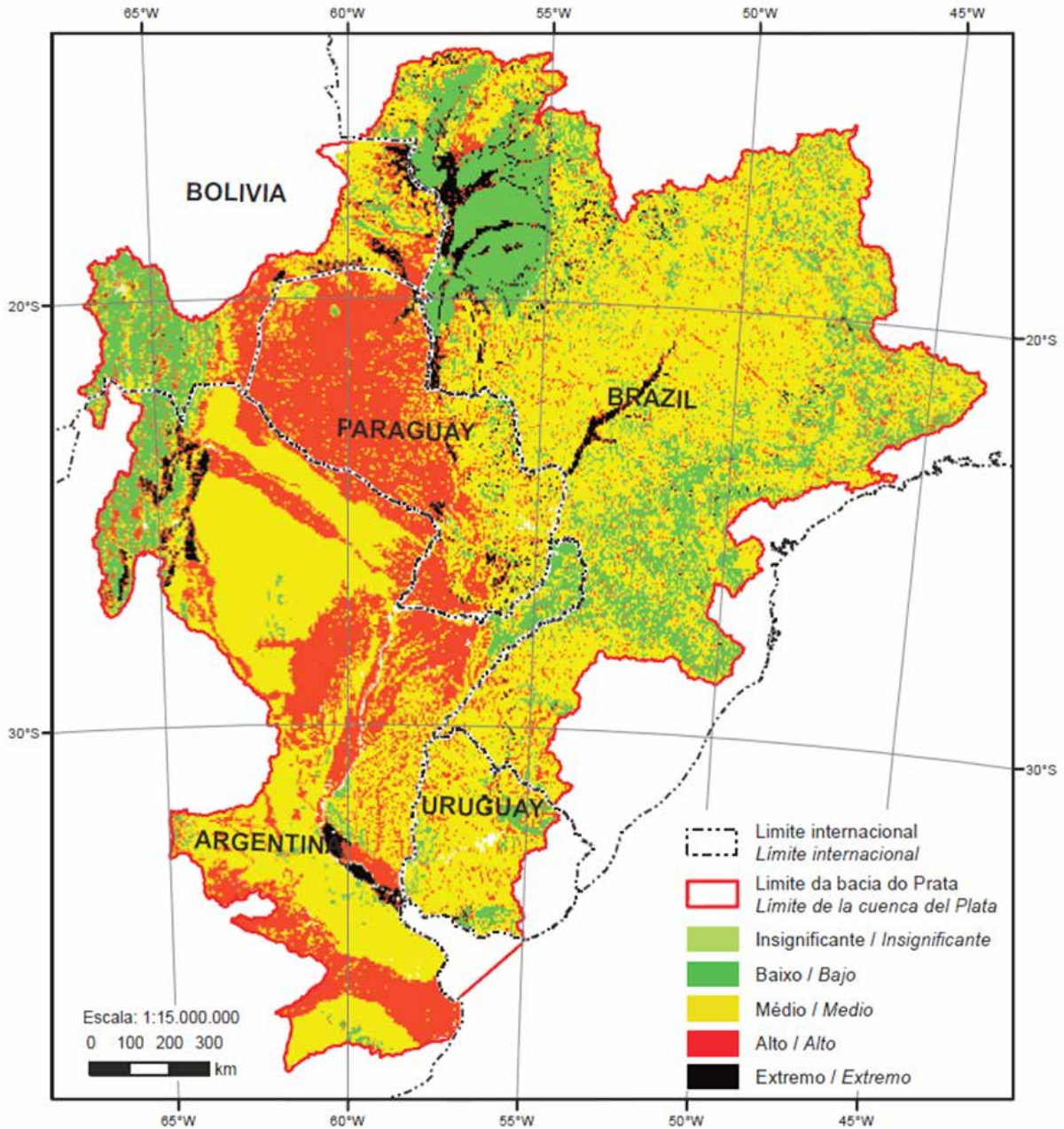
Índice de vulnerabilidad natural de los acuíferos



36

Figura 2.1.3.4

Vulnerabilidad natural de las aguas subterráneas de la Cuenca del Plata



Fuente: Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata, Programa Marco 2015

En Uruguay, la utilización de agua subterránea para abastecimiento humano es relativamente baja, ya que Montevideo —donde habita más de la mitad de la población del país— utiliza agua superficial y apenas el 20% del volumen total del agua utilizada para abastecimiento público es suministrada a las poblaciones del interior.

La **Figura 3.2.1.2** muestra una estimativa del volumen total anual explotado de agua subterránea en la Cuenca, tomando como base las siguientes premisas básicas:

- Abastecimiento humano público (Compañías de Saneamiento): 20 horas/día
- Abastecimiento humano privado (Condominios, etc.): 8 horas/día
- Abastecimiento industrial: 8 horas/día
- Abastecimiento rural: 8 horas/día

A partir de esos intervalos, el consumo total fue calculado a través de la siguiente fórmula:

$$V_{\text{TOTAL}} = V_{\text{PUBL.}} + V_{\text{PRIV.}} + V_{\text{IND.}} + V_{\text{RURAL}}$$

Siendo cada consumo individual calculado a través de la fórmula:

$$V = Q \text{ (m}^3\text{/h)} \cdot t \text{ (horas)}. \text{ 365}$$

2.1.4 Vulnerabilidad natural de los acuíferos a la contaminación

Para representar el grado de susceptibilidad de los acuíferos a ser afectados por una carga contaminante, se ha procedido a esbozar un mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas.

El método utilizado se basó en el trabajo realizado por DAEE-UNESP (2013) para el estado de San Pablo, que presenta una modificación del propuesto por Foster e Hirata (1988), donde se utilizan valores que cuantifican los parámetros físicos como condición del acuífero, tipo litológico y profundidad del nivel de agua.

La parametrización de la litología ha considerado el grado de consolidación, carácter litológico, grado de fracturación y capacidad relativa de atenuación, o sea, el contenido de arcilla.

La profundidad del nivel de agua se estimó en base a la superficie potenciométrica calculada para el área, sustraída de la superficie del modelo digital de terreno.

Para las tres clases de parámetros, cuanto más protegido, más macizo, mayor tenor de arcilla y más profundo fuera el nivel de agua, se definieron índices proporcionalmente menores. Asimismo, se consideró el nivel de la napa freática para los acuíferos libres o el techo para acuíferos confinados. La **Figura 2.1.3.3** presenta el índice de vulnerabilidad natural de los acuíferos, de acuerdo con el del DAEE-UNESP (2013).

La susceptibilidad a la contaminación para la Cuenca del Plata fue calculada para las porciones aflorantes y libres de los acuíferos, considerando una única superficie freática para toda la Cuenca.

La superficie potenciométrica se calculó a partir de la interpolación de los drenajes extraídos del MDT, asumiendo que esas fueran las cotas aflorantes de los acuíferos. Debido a limitaciones técnicas, la mejor resolución alcanzada para la interpolación fue de 300 m. La profundidad del nivel de agua representa la sustracción entre la superficie potenciométrica calculada y el propio MDT.

El mapa geológico fue clasificado de acuerdo con los índices atribuidos a la profundidad del nivel de agua. El resultado muestra que las regiones más bajas o con drenaje más denso, como el Chaco, Pantanal y los drenajes principales, presentan

vulnerabilidades altas a extremas. El compartimiento representado por la subcuenca sedimentaria del Paraná tiene vulnerabilidad media a baja en relación a las demás y porciones elevadas como los Andes bolivianos presentan bajo índice de vulnerabilidad.

Capítulo 3:

Actividades y productos generados por el Grupo Temático Aguas Subterráneas durante el desarrollo del Programa

3.1 Antecedentes del Grupo Temático Aguas Subterráneas

En una reunión llevada a cabo en Itaipú binacional (Paraguay) a mediados de noviembre de 2011, se consolidó el Grupo Temático Aguas Subterráneas y se establecieron las bases para la elaboración del mapa hidrogeológico síntesis de la Cuenca del Plata. En dicha oportunidad, se acordó para la caracterización de los acuíferos una escala de trabajo de 1:1.000.000 y para su presentación, una escala de 1:2.500.000.

En noviembre de 2012, se realizó un taller en Río de Janeiro donde se debatió sobre el uso y la explotación de los acuíferos transfronterizos del área y se discutió acerca de las mejores alternativas para su cartografía y representación.

El Servicio Geológico de Brasil presentó un catastro sobre los pozos existentes en la Cuenca, en su porción brasileña y una propuesta metodológica para la confección del mapa hidrogeológico de toda el área de ocurrencia de la Cuenca.

Una vez aceptada la propuesta, se definió la elaboración del mapa hidrogeológico de una hoja prototipo que abarcara varios países,

siendo escogida la hoja SH-21 llamada Uruguayana en Brasil, Concordia en Argentina y Arapey en Uruguay.

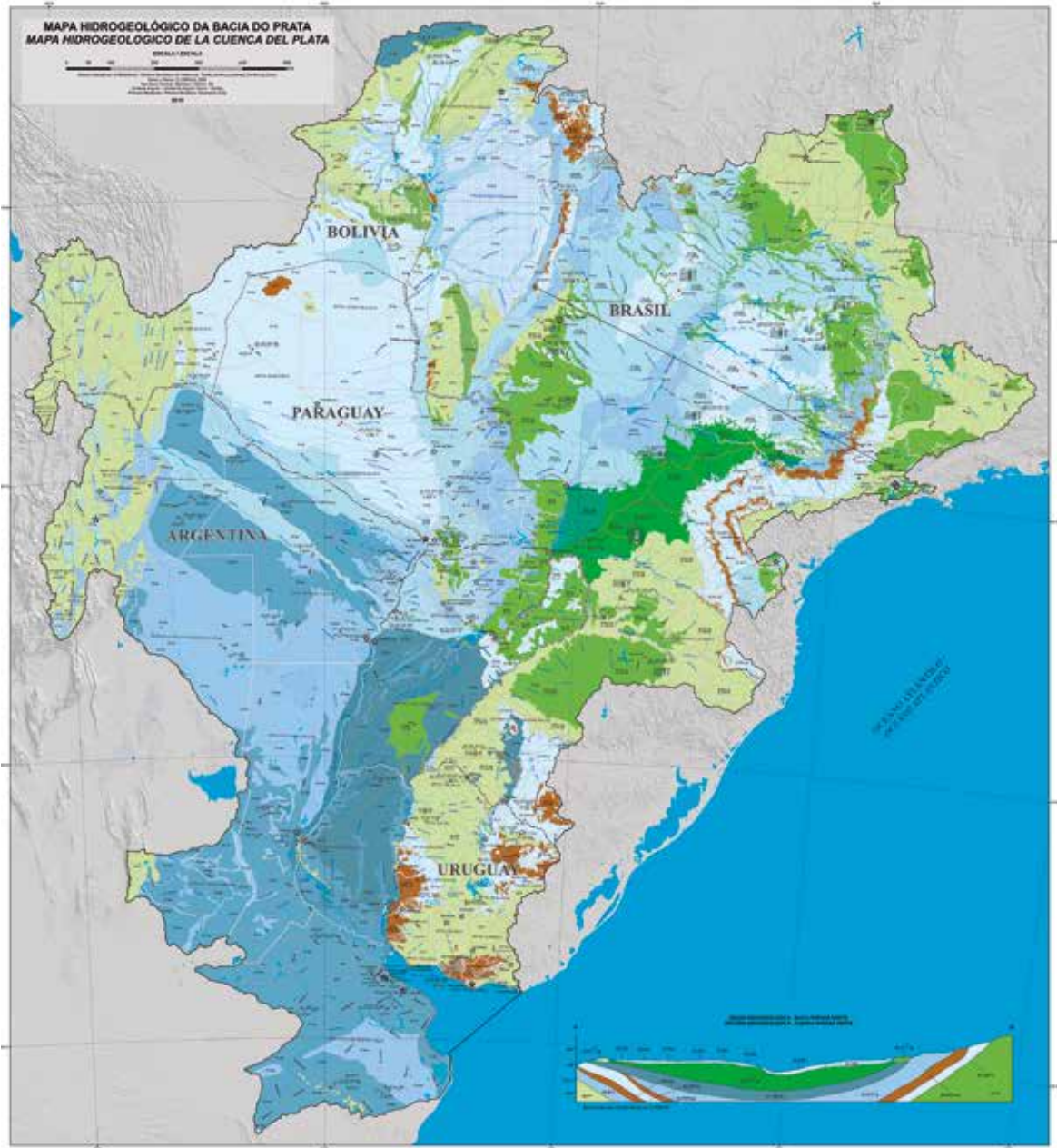
Esta misión quedó bajo la responsabilidad del Servicio Geológico de Brasil, que presentó la primera versión del producto en la reunión realizada en Montevideo entre los días 6 y 7 de mayo de 2013 y posteriormente, en Buenos Aires, entre el 30 de setiembre y el 1 de octubre del mismo año. Allí quedó definitivamente establecida la metodología propuesta.

A continuación, se realizaron reuniones multinacionales para el entrenamiento de los equipos de los otros países en la aplicación de la metodología, todas ellas en Brasil. Dos de los encuentros tuvieron lugar en las Superintendencias del SGB de Recife (del 9 al 13 de setiembre de 2013) y San Pablo (del 11 al 14 de noviembre del mismo año). Una tercera reunión, destinada a la confección de cartogramas temáticos de apoyo al mapa principal, fue realizada en la Universidad Estadual Paulista (UNESP), Campus de Río Claro (Brasil), entre los días 2 y 6 de junio de 2014.

Otros encuentros de trabajo, abocados a aspectos más generales de la Cuenca y del Programa Marco, se realizaron en las

Figura 3.2.1.1

Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata



Fuente: DAAE, 2013

ciudades de Foz de Iguazú (Brasil–del 19 al 20 de febrero de 2014) y Resistencia (Argentina–del 12 al 16 de mayo de 2014).

Finalmente, entre el 9 y el 11 de setiembre de 2014, se realizó en la Superintendencia de Porto Alegre del Servicio Geológico de Brasil una reunión para la presentación de la versión final del “Diagnóstico y Cartografía de las Aguas Subterráneas de la Cuenca del Plata”, documento del que trata el presente capítulo.

3.2 Mapa hidrogeológico síntesis de la Cuenca del Plata

3.2.1 Elaboración del mapa hidrogeológico

La metodología de elaboración del mapa fue concebida para planificar la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos en todo el cono sur de América. Por esa razón y considerando las dimensiones continentales involucradas, el trabajo procuró ser lo más uniforme posible, de acuerdo con los patrones internacionales de cartografía hidrogeológica. Se utilizó el sistema de coordenadas geográficas y el datum WGS 1984, lo que permitió asegurar el mismo nivel de precisión en la localización de datos para cualquier punto del área mapeada.

La base geológica, fuera de los casos de Brasil y Uruguay, fue elaborada a partir de informaciones brindadas por cada país participante, mientras que las demás bases (planimétrica, de pozos representativos, piezométrica e hidrológica) fueron aportadas por ellos o elaboradas a partir de programas computacionales utilizados.

A partir de la simplificación de los polígonos de geología brindados por cada país, en base a las características geométricas dominantes, formas de ocurrencia y

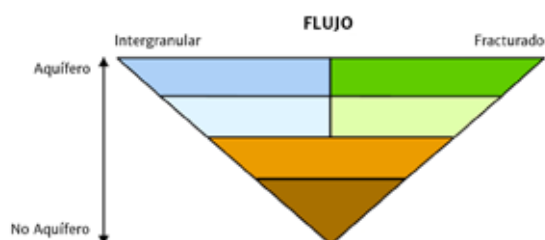
características de flujo de las aguas subterráneas en cada unidad, se crearon polígonos de hidrolitologías, definidos como grupos de unidades geológicas que almacenan y transmiten aguas subterráneas de forma semejante.

La utilización de estas clases de productividad, junto con la adopción de la simbología internacional de colores para mapas hidrogeológicos (Figura 3.2.1.2), permite que, a través de un rápido análisis, se consiga visualizar las principales características hidrogeológicas del área.

Este procedimiento permitió el establecimiento de cuatro unidades básicas de mapeo, genéricamente llamadas granulares, fracturadas, cársticas y no acuíferas.

Figura 3.2.1.2

Determinación de los sistemas acuíferos

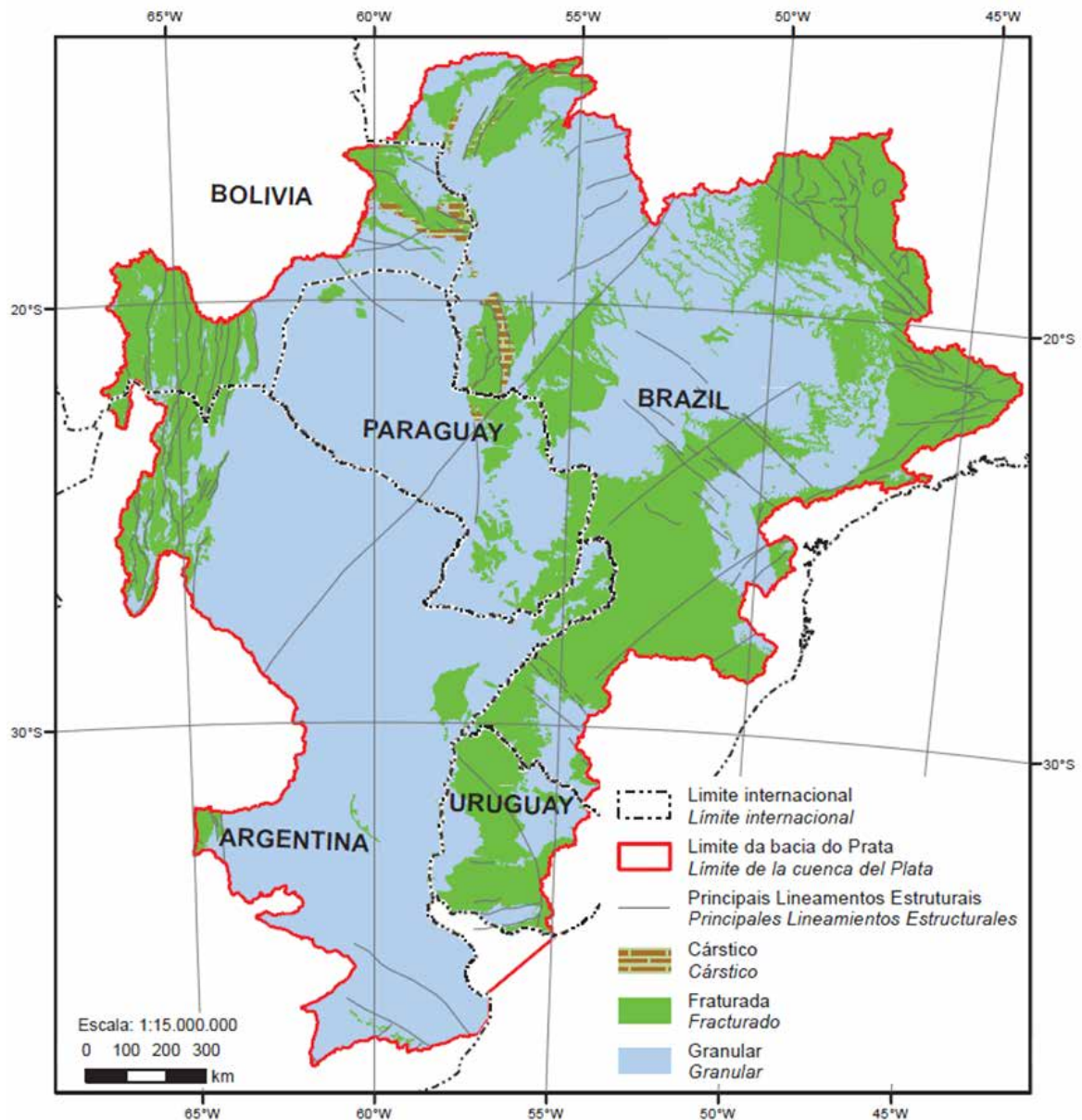


Fuente: AIH

Estas unidades fueron jerarquizadas bajo la óptica de producción de agua, para lo cual se utilizó una tabla de productividad acuífera (Tabla 2.1.2.1), basada en el trabajo de Struckmeier y Margat (1995). Puede encontrárselas representadas en el mapa por medio de la sigla de la unidad geológica seguida de un número del 1 al 5, que expresa su potencial de producción de agua.

Figura 3.2.1.3

Unidades hidrolíticas de la Cuenca del Plata



Fuente: Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata, Programa Marco, 2015

Las capas aflorantes que aparecen en el mapa (Figura 3.2.1.3), relacionadas a acuíferos o a no acuíferos, están representadas en una escala de colores, de acuerdo con la leyenda internacional. Los acuíferos son diferenciados en granulares y fracturados. Los acuíferos granulares son indicados en azul

y los cársticos y fracturados, en verde. En ambos casos, las tonalidades (azul o verde) más fuertes u oscuras se han reservado para los acuíferos de gran extensión y altamente productivos, mientras que las más claras se han empleado para otros acuíferos de menor nivel de productividad.

Los no acuíferos están indicados en color marrón. No fueron utilizados símbolos u ornamentos para diferenciaciones litológicas, excepto en el caso de los calcáreos, al procurar diferenciarlos de los demás cuerpos fracturados.

En el caso de ocurrencia de acuíferos superpuestos, se insertó la sigla del acuífero más productivo bajo aquella del aflorante. Por acuífero más productivo, se entiende aquel que “brinda más agua, de mejor calidad y a menor profundidad”.

3.2.2 Acuíferos transfronterizos

La Cuenca del Plata, debido a su gran extensión, contiene un número muy elevado de acuíferos, distribuidos en los territorios de los cinco países que la contienen, los cuales, sin embargo, no han sido estudiados en esta fase del Programa Marco.

Gran parte de estos acuíferos se encuentran íntegramente contenidos en el territorio de un solo país, mientras que otro importante conjunto es transfronterizo (compartido por dos o más países), aunque muchas veces presentan una superficie tan acotada para la Cuenca que, debido a las escalas empleadas, no llegan a ser representados en los mapas regionales. No obstante, dada su ubicación geográfica y características hidrogeológicas, son considerados estratégicos para el desarrollo socioeconómico interno del país o de la región que los contiene.

Ocho acuíferos o sistemas acuíferos de extensión regional y transfronterizos fueron cartografiados en la escala al millón y representados en el mapa síntesis en la escala 1:2.500.000 (**Figura 3.2.2.1**): el Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño (SAYTT), el Sistema Acuífero Pantanal, el Sistema Acuífero Agua Dulce, el Sistema Acuífero Caiuá/Baurú-Acaray, el Sistema Acuífero

Aquidauana– Aquidabán, el Sistema Acuífero Serra Geral, el Sistema Acuífero Guaraní y el Sistema Acuífero Permo-Carbonífero.

Se describirán a continuación los sistemas acuíferos mencionados, con excepción del Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño que será considerado en capítulo aparte, por ser objetivo de un proyecto piloto específico.

3.2.2.1 Sistema Acuífero Pantanal

El Sistema Acuífero Transfronterizo Pantanal está localizado en la subcuenca del río Paraguay y abarca áreas de Brasil, Bolivia y Paraguay, en una extensión estimada en aproximadamente 134.000 km² (102.000 km² en Brasil, 14.000 km² en Bolivia y 18.000 km² en Paraguay).

Desde el punto de vista fisiográfico, se ubica al norte del Chaco paraguayo en una región con alto índice pluviométrico, con medias que oscilan entre 1000 y 1500 mm, clima mesotérmico y cotas topográficas que varían entre 100 m y 200 m.

La importancia de este sistema acuífero radica en la manutención del ecosistema Pantanal, la mayor área húmeda del mundo, declarada Patrimonio de la Humanidad e integrante de la Convención Mundial de RAMSAR. En general, las aguas subterráneas son de buena calidad, aunque localmente puedan encontrarse significativos índices de carbonatos, hierro, materia orgánica y aguas salobres. Por tratarse de un acuífero libre, es muy vulnerable a la contaminación, principalmente asociada a actividades agrícolas (agrotóxicos) y ganaderas.

Los países, conscientes del papel desempeñado por el acuífero en el funcionamiento del ecosistema y en el control del tipo y distribución de la biodiversidad, han identificado la necesidad de una gestión

Figura 3.2.2.1

Acuíferos transfronterizos de la Cuenca del Plata



Acuíferos transfronterizos

- | | |
|---|--|
| Aquidaban - Aquidauana | Sistema Permo Carbonífero |
| Palermo - Estrada Nova - Río Bonito | Serra Geral |
| Agua Dulce | Pantanal |
| Bauru - Caiuá - Acaray | Sistema Acuífero Yrenda - Toba - Tarijeño (SAYTT) |
| Botucatu - Tacuarembó - Misiones - Piramboia - Buena Vista | Sistema Acuífero Guaraní (SAG) |

sustentable conjunta, basada en la comprensión de las interacciones hidráulicas entre las zonas húmedas y el sistema acuífero y en el reconocimiento de su interdependencia.

Además de eso, debido a la naturaleza freática del acuífero y su descarga, que se da principalmente a través de la evaporación, el Sistema Acuífero Transfronterizo Pantanal se constituye en un modelo ideal para evaluar los impactos de los cambios climáticos en el medio ambiente.

3.2.2.2 Sistema Acuífero Agua Dulce

El Sistema Acuífero Transfronterizo Agua Dulce es parte de una cuenca hidrogeológica regional compartida por Paraguay y Bolivia y está localizado en la porción norte del Gran Chaco paraguayo y del este de Bolivia.

En este sistema, se destacan los acuíferos carboníferos y cretácicos, mientras que las unidades paleozoicas son confinadas y presentan fuerte mineralización y termalismo.

Los acuíferos de agua dulce se componen de areniscas cretácicas rojizas, groseras y mal seleccionadas, en conjunto con otras unidades terciarias, finas a medias y friables, localmente semi-confinadas y limitadas por capas de arcillas plásticas.

En Paraguay, el sistema se constituye como un acuífero regional de alto potencial, en gran parte inexplorado, con una extensión en torno de los 30.000 km². Los datos de pozos en el área indican caudales de hasta 18 m³/h para los acuíferos carboníferos y 36 m³/h para los cretácicos, con aguas de muy buena calidad.

El clima en el área de influencia del sistema Agua Dulce es semiárido a tropical húmedo

al este y seco al oeste, con inviernos secos y una temperatura ambiente que varía de 18 a 26° C. La precipitación anual oscila entre 1400 a 1500 mm.

En términos topográficos, la región está caracterizada como Chaco liso, con algunas ocurrencias de colinas y montañas aisladas. Predomina una vegetación xerófita dominada por arbustos bajos y espinosos.

La población es dispersa y reducida y se dedica al cultivo agrícola y a la cría de ganado. Dado que es uno de los pocos acuíferos de agua dulce de la región, tiene una gran importancia para la irrigación y el consumo humano y cuenta con posibilidades de constituirse en una solución para el desarrollo sustentable de la región.

3.2.2.3 Sistema Acuífero Caiuá/Baurú-Acaray

El Sistema Acuífero Caiuá/ Baurú –Acaray está localizado en la cuenca del Paraná y ocupa un área de aproximadamente 300.000 km², en la región noroeste de Paraguay, principalmente al norte del departamento de Canindeyú en la frontera brasileña y próximo a los estados de San Pablo, Paraná, Mato Grosso del Sur, Goiás y Minas Gerais. Su dirección de flujo predominante se establece hacia el río Paraná.

El acuífero, compuesto por areniscas finas y gruesas, con alta permeabilidad, es del tipo libre y tiene un espesor medio de 200 m. Se le aplican las denominaciones de Formación Caiuá y Formación Baurú en Brasil y de Formación Acaray en Paraguay.

El acuífero en la Unidad Caiuá tiene un alto potencial de explotación, con caudales entre 40 y 60 m³/h. En la Unidad Baurú, en cambio, sus caudales son moderados y varían de 10 a 20 m³/h.

Su explotación se concentra sobre todo en los estados de San Pablo y Paraná, mientras que en el de Mato Grosso del Sur y en Paraguay, su utilización es menor. Contiene un agua de buena calidad, con ocurrencia de aguas minerales, que se destina principalmente al consumo humano y a la actividad agropecuaria. Sin embargo, esta última origina problemas de contaminación, a partir del uso de fertilizantes y agrotóxicos.

El acuífero es de importancia hidrogeológica regional, debido a su buena calidad de agua y sus pozos de alta productividad para irrigación, agua mineral y uso agro-pastoril (en Paraguay).

3.2.2.4 Sistema Acuífero Aquidauana-Aquidabán

El Sistema Acuífero Aquidauana-Aquidabán está localizado en la cuenca del río Paraná, con un área de aproximadamente 27.000 km², de los cuales se encuentran 12.300 km² en Paraguay y 14.600 km² en Brasil (una parte de su área de ocurrencia se sitúa en el área de protección del Pantanal). Se extiende del noreste al sudoeste. Su relieve es plano a suavemente ondulado, con altitudes entre 400-800 m. Es utilizado principalmente para el abastecimiento humano y animal, tanto en Brasil como en Paraguay.

El clima en esta región es cálido en verano, con una temperatura media de 32°C y frío y seco en invierno, con una media anual en torno de los 21°C. Las precipitaciones oscilan de 1000 a 1500 mm y se concentran en verano.

El acuífero es del tipo semi-confinado, constituido por sedimentos glacio-marinos, con intensas variaciones de facies y caudales bastante dispersos, con valores medios entre 10-20 m³/h/pozo. Del mismo modo,

presenta aguas con características bastante variables desde el punto de vista químico.

Su utilización se ha tornado esencial para el abastecimiento humano y para permitir el desarrollo económico de la región en el corto plazo, con predominio de las actividades agrícolas y ganaderas.

3.2.2.5 Sistema Acuífero Serra Geral (SASG)

El Sistema Acuífero Serra Geral abarca todo el Planalto paranaense y la región fronteriza de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, con un área de aproximada de 540.000 km².

A pesar de conocerse poco sobre sus condiciones de recarga, es ampliamente explotado en esos cuatro países para el abastecimiento humano, uso industrial y riego.

Constituye un sistema acuífero de tipo libre a semi-confinado, fracturado y conformado por derrames de lavas basálticas de las formaciones Alto Paraná (Paraguay), Serra Geral (Brasil) y Arapey (Argentina y Uruguay).

Debido a sus características de acuífero fracturado, presenta caudales muy variables, con valores entre 10 y 100 m³/h. Sus aguas son bicarbonatadas cálcicas y sódicas, con tenores de sal eventualmente altos.

El clima de la región es húmedo a semi-húmedo, con una precipitación media anual de entre 1.200 y 1.500 mm.

Este acuífero es altamente explotado para el abastecimiento público e industrial y tiene gran potencial turístico, además de ser importante para la conservación del ecosistema dependiente y para garantizar el flujo de base de los ríos de la región, en la medida en que se infiere una conexión hidráulica entre él y el Acuífero Guaraní.

3.2.2.6 Sistema Acuífero Guaraní (SAG)

El Sistema Acuífero Guaraní está localizado en gran parte de la Cuenca del Río de la Plata, y se extiende desde la subcuenca sedimentaria del Paraná hacia el área de la cuenca del Chaco Paranaense.

Ocupa un área de aproximadamente 1.088.000 km², abarcando territorios en cuatro países: Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay.

El clima regional en su área de ocurrencia está caracterizado como húmedo a sub-húmedo, con lluvias que van de 1.200 a 1.500 mm/año.

Sus aguas tienen amplia utilización en el abastecimiento humano, industrial y en el turismo, como consecuencia de sus propiedades térmicas en los lugares donde este acuífero está confinado por los basaltos de Serra Geral.

El SAG está formado por areniscas eólicas del período Jurásico de las formaciones Botucatú (Brasil), Tacuarembó (Argentina), Tacuarembó/Rivera (Uruguay) y Misiones (Paraguay) y por las areniscas fluvio-lacustres del Triásico, de las formaciones Pirambóia/Rosário do Sul (Brasil).

Las zonas de afloramiento ocurren en dos fajas situadas al oeste y este del área de ocurrencia y corresponden a aproximadamente al 10% del área total del acuífero, que es confinado en el 90% restante.

Su espesor medio es de 250 m, mientras que los caudales varían entre 60 a 200 m³/h en áreas próximas a las zonas de afloramientos y de 200 a 400 m³/h en las áreas confinadas.

Las aguas son bicarbonatadas cálcico-magnesianas en las inmediaciones de las áreas de afloramiento y sódicas en zonas más

profundas. El pH es alcalino y los valores de residuo seco varían de 200 a 600 mg/l. Su temperatura oscila de 18 a 63 °C, dependiendo de la profundidad de ocurrencia del acuífero.

Este sistema acuífero es de gran importancia a nivel regional y transnacional y representa un recurso fundamental tanto para el desarrollo socioeconómico como para el funcionamiento y manutención de los ecosistemas asociados, por lo que ha sido objeto de un proyecto específico, financiado por el Banco Mundial y desarrollado por la OEA y los cuatro países en el período 2003-2008.

3.2.2.7 Sistema Acuífero Permo-Carbonífero

Este Sistema Acuífero Transfronterizo está localizado en la cuenca hidrográfica del río Uruguay, con un área de 41.000 km², de los cuales 20.000 km² se encuentran en territorio uruguayo y 21.000 km² en Brasil. Aflora en la porción sur de Brasil y nordeste de Uruguay, entre las latitudes 52° y 56° W y 30° a 34° S y continúa en superficie en la zona oriental de esas áreas.

La región es conocida como depresión central Gaúcha y constituye un área sin grandes variaciones altimétricas. Sus picos más altos se localizan a unos 200 m de altura y presentan un relieve conocido como coxilhas.

El clima es templado húmedo, con lluvias a lo largo de todo el año, precipitaciones medias de 1.500 mm/año y temperaturas que varían entre los 3 °C y los 22 °C.

El acuífero es poroso, no consolidado a consolidado y de baja productividad. Incluye la unidad Tres Islas en Uruguay, constituida por areniscas finas a medias con niveles de arena gruesa y grava. En Brasil, exhibe una fuerte cementación arcillosa.

Figura 3.3.1.2

Perfil Hidrogeológico SAYTT y su ubicación en el Valle de Yacuiba

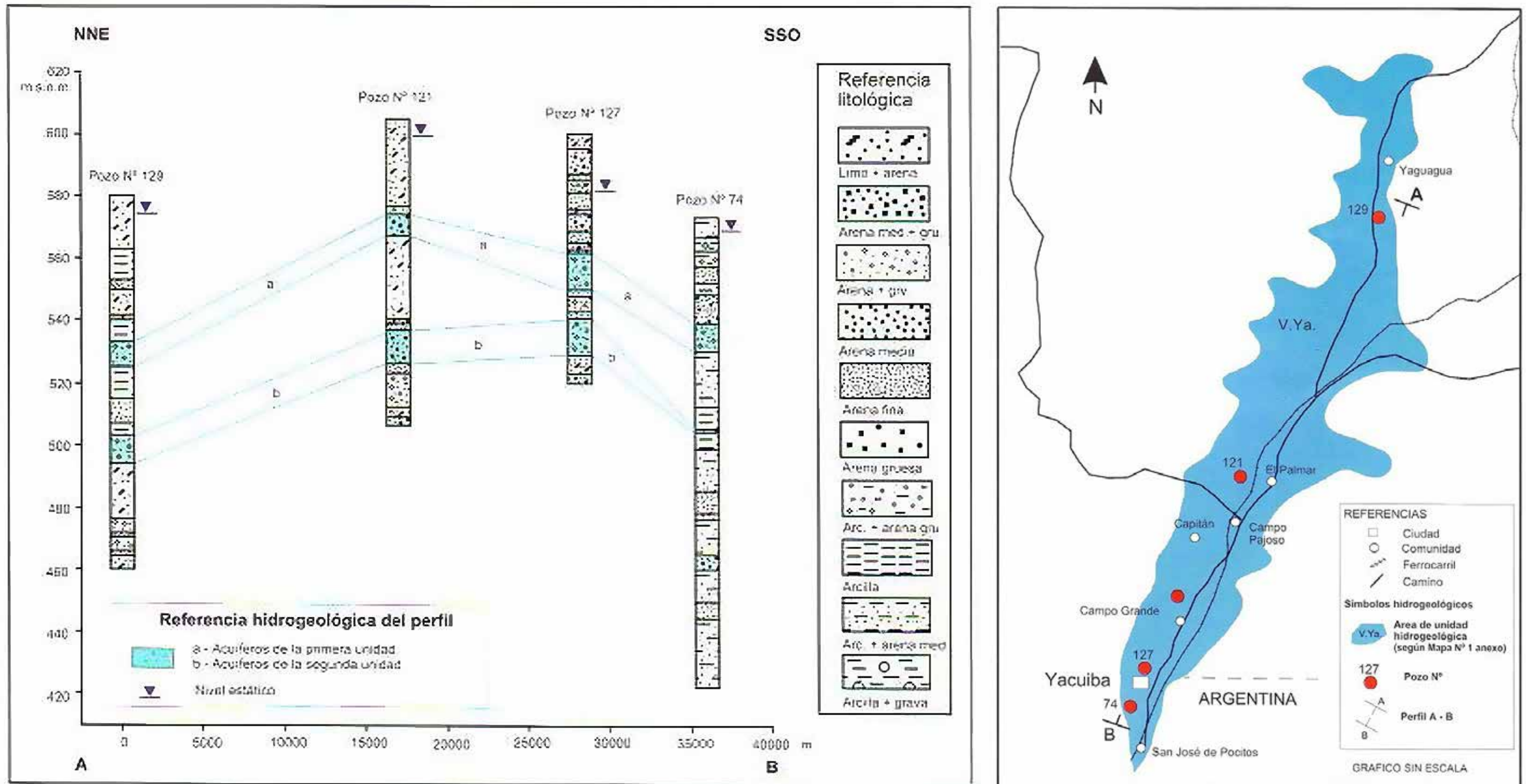


Figura 3.3.1.3
Perfiles hidrogeológicos en Argentina:

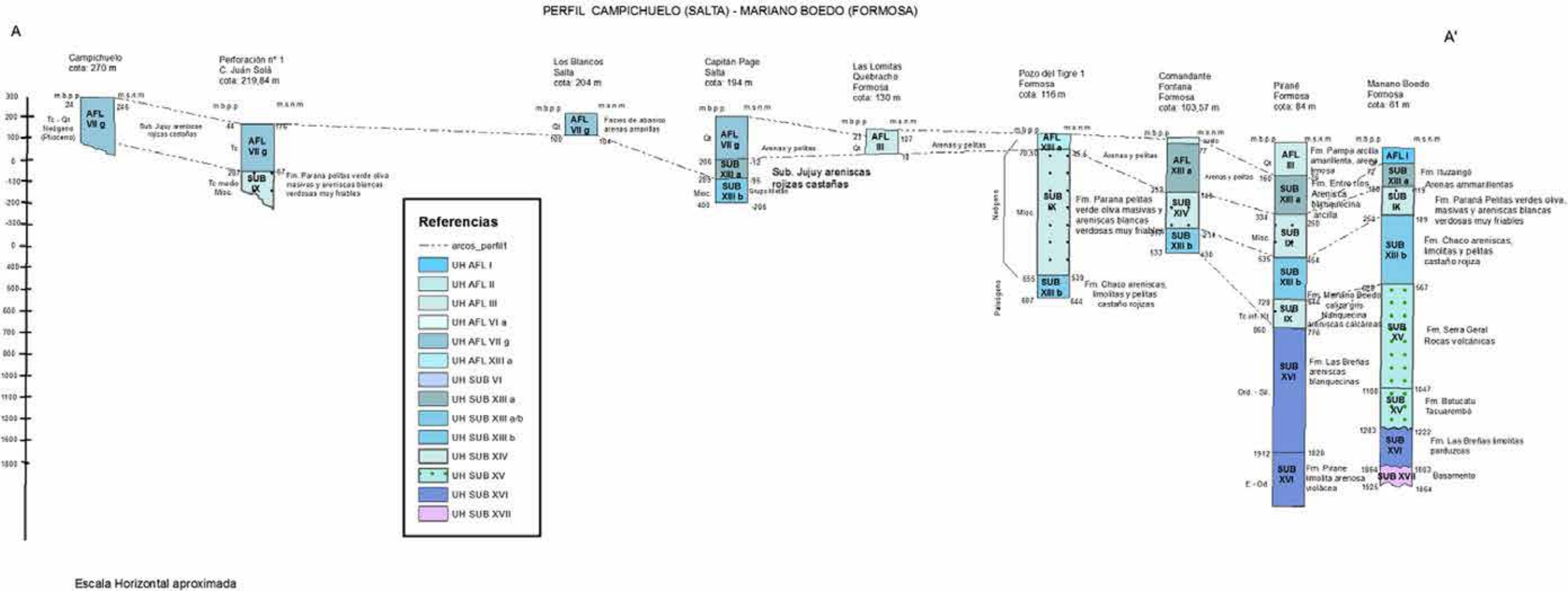


Figura 3.3.1.3
Perfiles hidrogeológicos en Argentina:

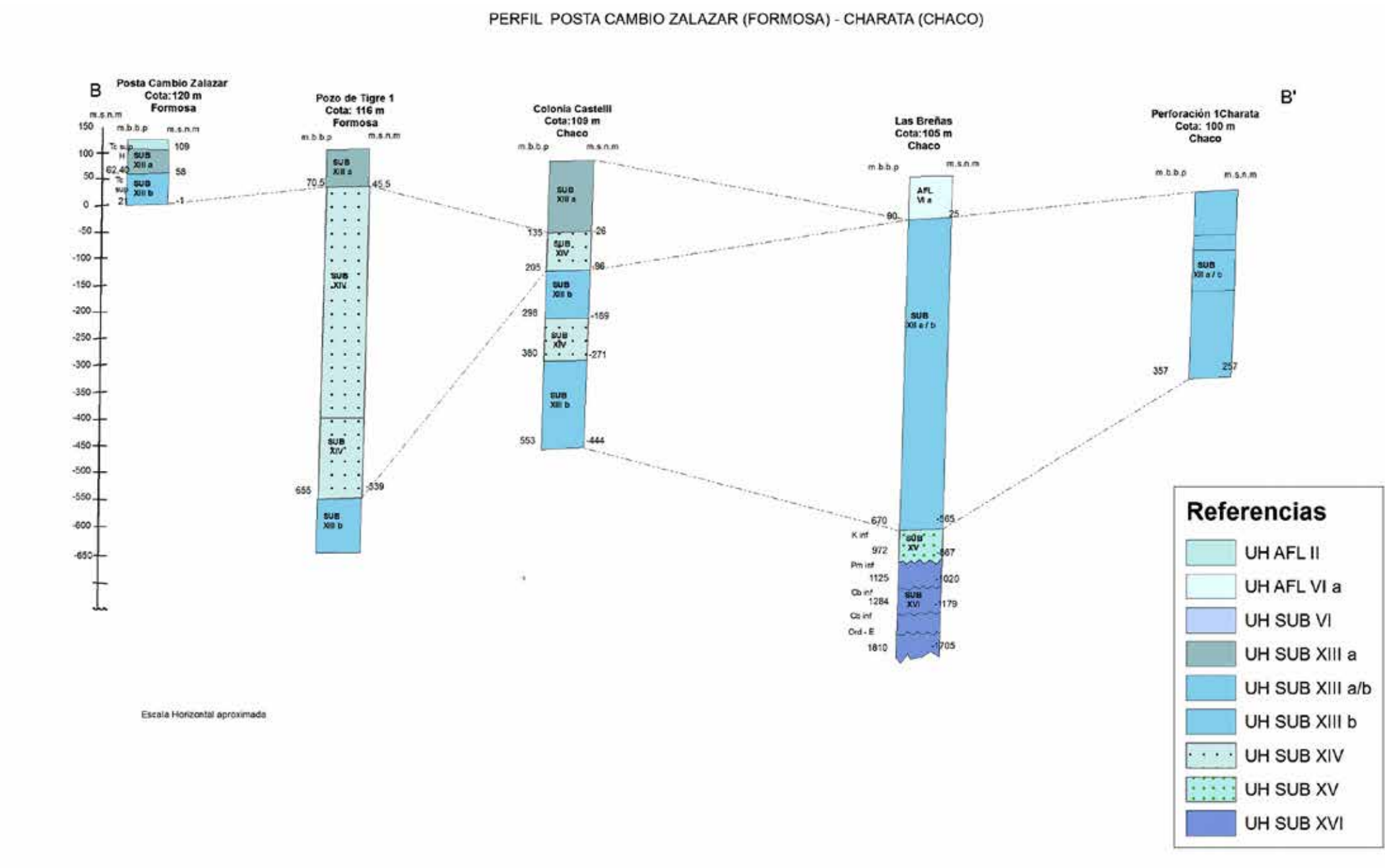


Figura 3.3.1.4

Corte hidrogeológico W-E, de Pozo Hondo y Estancia "La Niña"

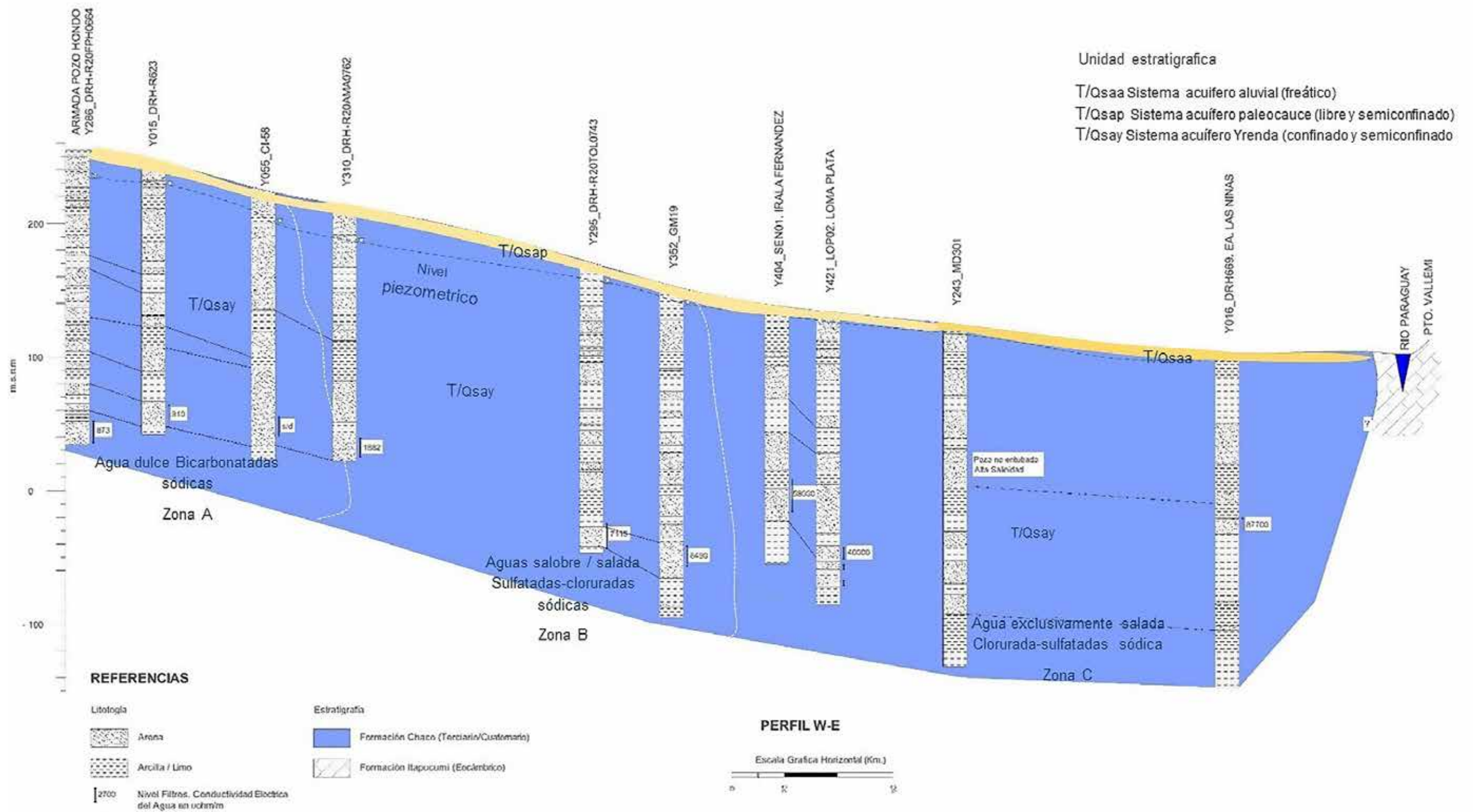
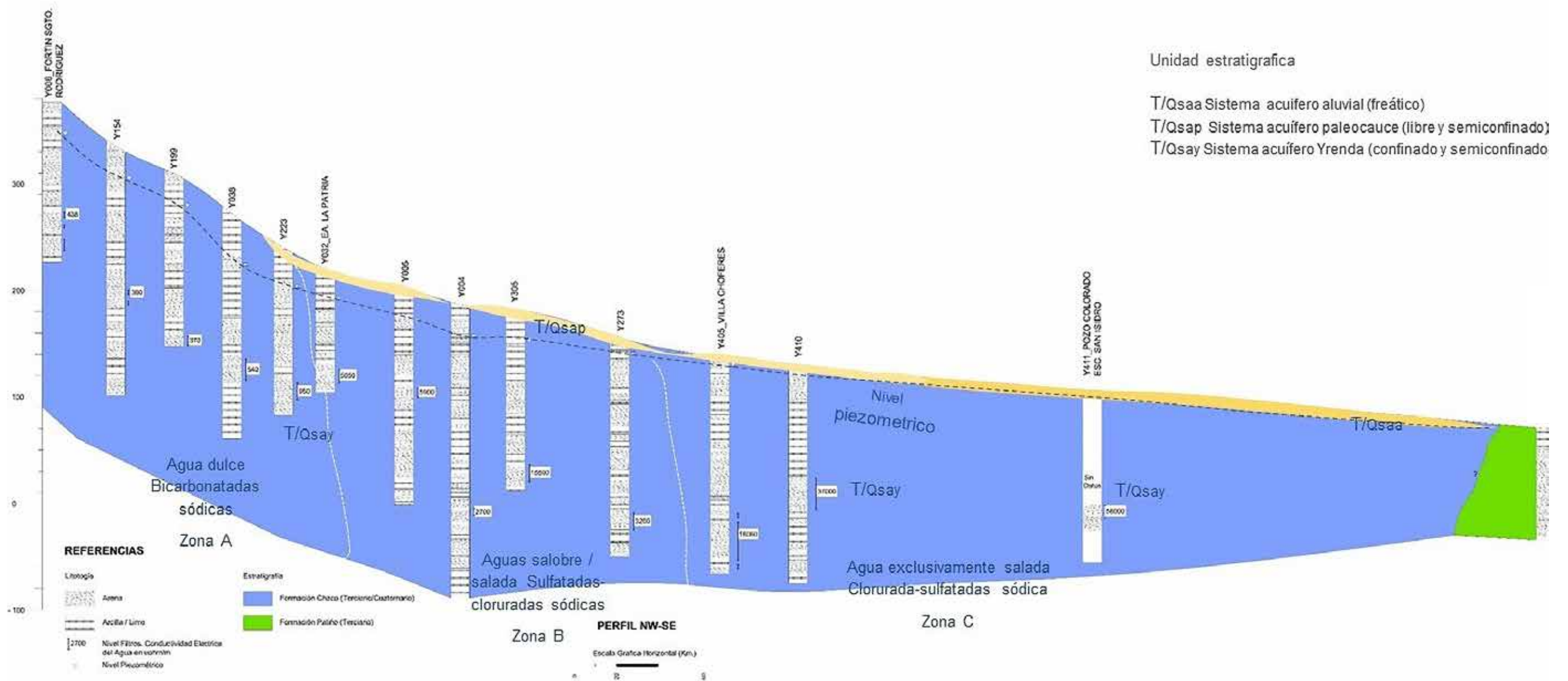


Figura 3.3.1.5

Corte hidrogeológico a lo largo de la ruta Transchaco NW-SE



3.3 Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño

3.3.1 Generalidades

En el ámbito del Programa Marco y dentro del subcomponente II.3 Aguas subterráneas, se definió la implementación de un proyecto piloto demostrativo prioritario sobre el Sistema Acuífero Yrendá-Toba-Tarijeño (SAYTT).

El SAYTT se encuentra en la región del Gran Chaco sudamericano, compartido por Argentina, Bolivia y Paraguay y representa uno de los más importantes reservorios de agua dulce transfronteriza y subterránea de esta región, además de uno de los más significativos en el continente sudamericano (Couyoupetrou 2014). Su potencial de agua subterránea es hasta ahora poco conocido, lo que hace necesaria una extensiva investigación y análisis de sus volúmenes de recarga y de sus capacidades de almacenamiento y de explotación.

En octubre de 2013, se realizó un taller de trabajo en SEGEMAR en el cual se acordaron los límites de estudio del SAYTT. Se estableció como límite norte al Cuaternario, Triásico y Carbonífero (Paraguay), incluyendo al campo de dunas del paleodelta del río Parapití; el límite oeste se ajustó al contacto de las unidades aflorantes con el Cuaternario en la vergencia oriental del piedemonte de las Sierras Subandinas (Bolivia y Argentina), el sistema de Santa Bárbara y el noreste de las Sierras Pampeanas (Argentina); el límite sur se acordó según la misma definición, tomando el cauce del río Salí, excluyendo las Lomas de Otumpa y continuando hacia el este por el Cuaternario; y, como límite oriental, se mantuvieron los ríos Paraguay y Paraná.

A partir de la cartografía hidrogeológica elaborada por los países que contienen el

sistema acuífero, se confeccionó el mapa integrado de las unidades hidrogeológicas del SAYTT (**Figura 3.3.1.1**). Dentro del proceso de elaboración de este mapa, se efectuó la integración planimétrica del ámbito del SAYTT de Argentina, Bolivia y Paraguay. En este rubro, se privilegió la información relativa a límites políticos, hidrografía y localidades de interés. Las estructuras geológicas fueron integradas a partir del Mapa Geológico del SAYTT, escala 1:500.000 por Servicio Geológico Minero de Argentina (SEGEMAR), Servicio Nacional de Geología y Técnico en Minas (SERGEOTECMIN) y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAYA) de Bolivia y la Secretaría del Ambiente de Paraguay.¹

En el mapa integrado se indica la ubicación de los pozos representativos muestreados y censados por los tres países, en base a parámetros de interés como profundidad, nivel estático y dinámico, caudal, conductividad eléctrica, temperatura y pH del agua y sólidos disueltos, consignándose también la fecha de medición cuando estaba disponible.

Perfiles Paraguay:

En la **Figura 3.3.1.4** se muestra el corte hidrogeológico W-E, de Pozo Hondo, donde los acuíferos más superiores son salobres y el más profundo es agua dulce y Estancia “La Niña” (cercano a Pto. Sastre) acuíferos todos salados. Se observan las zonificaciones químicas aproximadas, mostrando la evolución química de oeste este.

En la **Figura 3.3.1.5**, se grafica el corte hidrogeológico a lo largo de la ruta Transchaco NW-SE, de Sargento Rodríguez (frontera con Bolivia), donde los acuíferos son de buena calidad, pasando por

¹ Los mapas en alta resolución pueden ser descargados desde la página web del CIC

Tte. 1ro. Irala Fernández, donde los acuíferos son todos salados y llegando hasta el límite cercano al río Paraguay, donde se tiene un acuífero de areniscas rojizas con niveles de areniscas arcillosas dulce de la Formación Patiño del Cretácico/Terciario. Se observan las zonificaciones químicas aproximadas, mostrando la evolución química de noroeste a sureste.

3.3.2 Unidades hidrogeológicas de síntesis

La integración de la cartografía hidrogeológica digital del SAYTT de Argentina, Bolivia y Paraguay se basó en la similitud de las características litoestratigráficas de superficie y en los parámetros hidrogeológicos, obtenidos como resultado de los censos y monitoreos hidrogeológicos e isotópicos efectuados por los tres países durante la ejecución del Programa Marco. Se definieron diez unidades hidrogeológicas de relevancia, quedando dos unidades menores fuera de la resolución del mapa de integración a escala 1:500.000.

3.3.2.1 Unidad I. Chaco Boreal. Centro Norte.

En Paraguay, esta zona es reconocida como unidad “A” y se caracteriza hidroquímica-mente por contener agua dulce.

En el área noreste entre Gral. Garay y Fn. Tte. Enciso, se encuentra agua dulce entre los 50 m y 200–250 m de profundidad. En este tramo, se pueden diferenciar dos secciones en sentido vertical, relacionadas a las subdivisiones litológicas de la formación Chaco:

- La parte superior, hasta los 110–130 m de profundidad. Aquí, los acuíferos se caracterizan por su rendimiento muy variable y las capas no sobrepasan los 12 a 16 m de

espesor, llegando a 30 m hacia el límite sur de la zona (Naciones Unidas, 1978).

- La parte inferior, donde los acuíferos más importantes se encuentran por debajo de los 110–130 m de profundidad, alcanzando espesores de 25–45 m, que se acuñan hacia el sur.

La calidad de las aguas no varía en estas secciones. En ambos casos, se trata de agua dulce, cuya salinidad aumenta hacia el este-sureste, de 350–500 $\mu\text{mhos/cm}$ en la zona de Gral. Garay hasta 700 $\mu\text{mhos/cm}$ en Nueva Asunción y 1.300 $\mu\text{mhos/cm}$ en Tte. Enciso, donde en perforaciones posteriores se ha encontrado agua dulce de 500 $\mu\text{mhos/cm}$. El nivel del agua subterránea se encuentra por debajo de los 30 m de profundidad.

Tal como se esperaba, en el lado boliviano de esta unidad, por debajo del acuífero con agua salobre y a mayor profundidad que las mencionadas, se han encontrado aguas de buena calidad. En la perforación Pasig (1998), en el pozo “El Bolsón”, donde se ha detectado entre los 114 a 120 m de profundidad un acuífero con agua salobre que puede ser correlacionado con los acuíferos detectados en “Trencillas” (VI-17) y “Cruce” (VI-18), a partir de los 178 m de profundidad se han encontrado acuíferos con agua dulce, en sedimentos de arena gruesa y gravas. Por ejemplo, en los niveles acuíferos de 185 a 194 y 224 a 244 m de profundidad se encuentran cantos rodados bien redondeados de hasta 3 cm de diámetro, que se manifiestan de igual manera que en el Chaco paraguayano pero con granulometría menor.

3.3.2.2 Unidad II. Chaco Boreal.- Zona central y suroeste

Esta unidad corresponde a la zona B. En Paraguay, entre Tte. Enciso y La Patria (km 628), comienza una franja de predominio de

agua salobre a salada, por debajo de la cual se presenta agua dulce, siendo ésta la característica más destacada de la zona.

En la parte media y sur, los acuíferos que se encuentran entre profundidades de 50 m y 120 a 170 m contienen agua salobre y salada. Generalmente, se presentan en arenas finas, mediana y hasta gravilla, interestratificadas con capas de limo, cristales de yeso. El nivel del agua subterránea está entre los 20 y 25 m de profundidad.

Por debajo de los 120 a 170 m de profundidad, habría variaciones de la velocidad de flujo y, por lo tanto, una mayor circulación del agua, lo que permite un mejor lavado de los componentes del acuífero, impidiendo la concentración de las sales y dando lugar al fenómeno de inversión de salinidad.

Según datos obtenidos de perforaciones de pozos en la zona de Fortín Mayor Infante Rivarola, en la frontera con Bolivia, el agua dulce comienza a los 120 m con caudales aproximados de hasta 80 m³/h. En Pozo Hondo, a los 198 a 212 m de profundidad el agua es dulce, siendo salobre en acuíferos menos profundos; y en Pedro P. Peña, la forma de ocurrencia del agua dulce es la misma.

En líneas generales, las características químicas del agua subterránea en esta zona son contenidos en sales de < 1.000 mg/L y bicarbonatadas cálcica-magnésica, en algunos casos bicarbonatadas sódicas. El bicarbonato claramente excede a todos los demás aniones. El muy bajo contenido en Cl⁻ es otra característica importante. La zona de Pedro P. Peña constituye un caso particular, dado que en ella, según ONU (1978), existiría una franja con acuíferos profundos salobres o salados.

Del lado boliviano, predominan las arenas medias a gruesa, gravas, hasta cantos

rodados, por su proximidad al área de recarga, siendo esa la zona con mejores condiciones hidrogeológicas para obtener agua de buena calidad (Fariña et al., 1996; Larroza, 2005).

Cabe mencionar la diferencia del comportamiento del agua subterránea fuera del sistema paleofluvial del río Pilcomayo al norte y al este del mismo, donde hasta los 120 a 150 m de profundidad, se encuentra agua con conductividades mayores de 2.000 µmhos/cm.

En Bolivia, esta unidad se encuentra ubicada al norte del cono aluvial del río Pilcomayo, al este de los afloramientos terciarios de la serranía de Ibibobo y al oeste del límite con Paraguay. El sector dispone de muy poca información hidrogeológica. Sin embargo, en la base a los S.E.V. realizados por el proyecto y el análisis de los perfiles de las perforaciones profundas (hasta 400 mbs) efectuadas por YPFB y CODETAR (pozo N° 135 “El Palmar” y N° 138 “Quintín Ortiz”), se observa un paquete sedimentario de gran potencia, que se extiende hasta aproximadamente 160 mbs y que está constituido por gran cantidad de niveles arcillosos, intercalados por algunas capas de arena fina y presencia de algunos horizontes de calizas y margas (según lo descrito en el informe del pozo “El Palmar” de YPFB).

Los acuíferos que pudiesen existir en estos niveles son de poca importancia hidrogeológica y posiblemente con contenido de agua salobre. Esto puede corroborarse también mediante los resultados de la prospección geofísica realizada en el lugar y que ha indicado valores de resistividad eléctrica no superiores a los 13 ohmm para las formaciones ubicadas entre los 30 y 160 m de profundidad (Garabito et al., 1994). A partir de los 160 m de profundidad, aparece una sucesión de acuíferos semiconfinados y confinados de excelentes rendimientos (con

caudales de hasta 3,5 l/s registrados en el pozo N° 138), constituidos por 80 a 90 % de arenas medias a gruesas y 10 a 20 % de arcillas. Estos acuíferos tienen continuidad incluso hasta 400 mbs. La calidad química del agua subterránea de estos acuíferos profundos (a más de 160 mbs) es dulce y de características bicarbonatadas.

Asimismo, entre los afloramientos terciarios de la serranía de Ibibobo al este y las serranías del norte de Villamontes al oeste, se han encontrado acuíferos semiconfinados de considerable potencia, ubicados por debajo de los 80 m de profundidad. Los mismos están constituidos en gran parte por sedimentos de granulometría media a gruesa (especialmente arenas medias a gruesas y algunos niveles de gravas). El agua subterránea analizada en diferentes pozos del área (por ejemplo, el pozo N° 90), ha demostrado tener características físico-químicas similares a aquellas del área del puesto La Burra en el sector de Yacuiba (pozo N° 103). En su mayoría, es de tipo sódica bicarbonatada sulfatada.

3.3.2.3 Unidad III. Chaco Boreal este e interfluvios

En Bolivia, a este grupo pertenecen las Paleoterrazas Hsa (Pt), ubicados dentro del cono aluvial del río Pilcomayo. Los sectores topográficamente más elevados han sido denominados Paleoterrazas o Interfluvios y tienen características hidrogeológicas e hidroquímicas diferentes a los Paleocanales. En general, estos sectores presentan acuíferos con agua salada, por lo menos aquellos ubicados hasta 150 mbs. Un ejemplo claro de lo expresado se puede ver en el área ubicada en el extremo norte del cono aluvial (sector del pozo N° 92 “Las Trencillas”, pozos N° 93 “El Cruce” y pozo N° 142 “El Bolsón”), donde se presentan acuíferos libres y/o semiconfinados, compuestos por arenas

y gravas. Los acuíferos ubicados entre los 120 y 140 mbs contienen agua de características sódicas sulfatadas cloruradas (p.ej. pozo N° 142 “El Bolsón”) y conductividades eléctricas del agua elevadas, que se sitúan entre los 1.500 y 5.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Las características físico-químicas del agua del pozo N° 142 “El Bolsón” han sufrido una gran salinización, que ha elevado la conductividad eléctrica del agua subterránea de 2.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valores registrados durante las 60 horas de desarrollo del pozo mediante compresor) a más de 12.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (valores obtenidos durante el ensayo de bombeo). El agua subterránea obtenida durante el ensayo de bombeo corresponde a la facies clorurada sódica. El origen de esta salinización aún no está muy claro. Los valores de resistividad eléctrica de las formaciones obtenidas en el perfilaje de pozo son de 20 a 25 ohmm para capas sedimentarias potencialmente explotables y de 6 a 7 ohmm para capas sedimentarias menos favorables a la explotación de agua subterránea. Con estos valores, resulta poco probable encontrar acuíferos que contengan una conductividad de 12.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como los que se han obtenido. Una de las causas que podrían haber llevado a la salinización del agua subterránea en este pozo es la contaminación de los acuíferos por parte de otros superiores (aquellos ubicados entre 114 y 129 mbs), que han demostrado contener agua de una elevada salinidad.

Denominada localmente en Paraguay como Zona C, esta unidad contiene agua salada. En Loma Plata (Pozos N° Y-030 – N° Y-419), tanto las capas acuíferas de 56 m como las más profundas (hasta 205 m de profundidad) presentan una conductividad eléctrica de 40.000 $\mu\text{mhos}/\text{cm}$.

En dirección este, hacia las Colonias Mennonitas, se va incrementando la salinidad

llegando a 87.700 $\mu\text{mhos/cm}$ en un pozo la Estancia “Las Niñas”, ubicada en Sastre, cerca del río Paraguay (Pozo N° Y-016).

En Tte. 1ro. Irala Fernández (ex 25 Leguas), en el pozo con identificación Y-27, los acuíferos tienen una salinidad de 52.000 a 60.000 $\mu\text{mhos/cm}$ y una profundidad de 70 metros.

También en la parte norte de esta zona Y-343, 347, en el área de Carlos Antonio López (Ea. Don Enrique) y Tte. Martínez Piantuta respectivamente, existen acuíferos de 104 m hasta 220 m de profundidad, cuyas aguas tienen conductividades eléctricas de 52.000 $\mu\text{mhos/cm}$.

Esta zona se caracteriza por la ocurrencia de humedales salobres a salados en la dirección del flujo subterráneo, siendo el agua subterránea salada de características químicas cloruradas y sulfatadas sódicas, con contenido muy bajo en bicarbonato. Además, es considerada área de descarga del acuífero y área de alta evaporación, debido a que el nivel del agua subterránea se encuentra cercano a la superficie, en ocasiones aflorante (como en el caso de las lagunas saladas) y a las altas temperaturas. En esta zona, las aguas subterráneas son exclusivamente saladas. La fuente de la alta salinidad regional son las evaporitas dispersas en los sedimentos arcillosos. El yeso es un mineral que se registra con frecuencia en los perfiles de las perforaciones juntamente con concreciones calcáreas. Evidentemente, existe también un suministro considerable de cloruro.

Los rasgos destacados de la zona son los paleocauces colmatados, llamados zonas de campo por los colonos menonitas. En ellos,

el agua dulce se almacena en las arenas y se encuentra flotando sobre el agua salada y es la fuente de abastecimiento limitada por el clima.

En el borde oriental, se encuentran como cursos temporarios las cabeceras de algunos riachos que se dirigen al río Paraguay, como el San Carlos o el río Verde y también lagunas permanentes relativamente abundantes, que le dan a este sector un carácter de transición entre la planicie chaqueña disectada y el área deprimida del Chaco oriental.

También la zona central pertenece a dos ambientes diferentes: semiárido en el oeste y sub húmedo-seco en el este. No se han encontrado acuíferos profundos dulces, siendo el único recurso de agua subterránea potable los lentes de agua dulce a salobre que ocurren en los acuíferos freáticos, donde las condiciones de infiltración son favorables, llegando a veces hasta el segundo acuífero semiconfinado.

Estas condiciones se presentan sobre todo en las zonas de campo del área de las colonias menonitas. En campo, los bolsones de agua dulce solo se encontraron asociados a las lagunas de agua dulce, especialmente aquellas formadas en cursos fluviales temporarios, en Mcal. Estigarribia y Gral. Díaz. El segundo acuífero contiene agua salada, es un acuífero semiconfinado a nivel regional y su nivel piezométrico se encuentra cercano al nivel freático. Esto ocasionaría un constante flujo de agua salada hacia el acuífero freático, como efectivamente ocurre en Tte. 1ro. Irala Fernández (ex 25 Leguas), fenómeno que reduce considerablemente las posibilidades de encontrar agua subterránea dulce en el área.

3.3.2.4 Unidad IV. Planicie aluvial del río Paraguay

El acuífero de la Planicie aluvial del río Paraguay se implanta sobre sedimentos aluviales arenosos y pelíticos con moderado contenido de materia orgánica. En este caso, el acuífero es de carácter freático y se encuentra libre o semiconfinado y contiene agua dulce, ya que es alimentado en forma influente por las aguas del río Paraguay.

Esta fase de agua dulce puede presentarse flotando literalmente sobre agua salada, debido a que la velocidad de circulación horizontal es mayor que la velocidad de difusión de las sales, producto de las áreas de inundación de los ríos de la Unidad III, Chaco Boreal este e interfluvios.

En cuanto a sus caracteres hidrogeológicos, por analogía, compartiría rasgos generales con el primer acuífero de la Unidad VI, Chaco Aluvial, Paleocanal y Pilcomayo.

3.3.2.5 Unidad V. Sierras Subandinas, Pampeanas y Pedemonte

Esta unidad se ubica entre las sierras subandinas y la llanura Chaco y Chaco-Beniña de Argentina y Bolivia. Está constituida morfológicamente por serranías que coinciden con las estructuras anticlinales, las cuales son atravesadas transversalmente por ríos antecedentes, en una etapa juvenil de erosión. Las estructuras sinclinales son por lo general dos o tres veces más amplias que los anticlinales y conforman grandes valles agrícolas atravesados por ríos longitudinales.

Representa una zona de transición a manera de un amplio piedemonte, entre las serranías vecinas que limitan el subandino y la llanura propiamente dicha. En el

piedemonte, se presentan paisajes colinares modelados en depósitos aluviales terciarios y cuaternarios, elevados por actividad tectónica y entre ellos, pequeños valles.

En Bolivia, esta unidad abarca los contrafuertes orientales de la serranías de Aguargüe y de Aguarenda. Estas serranías o sectores más elevados poseen suelos profundos a moderados, bien drenados, con moderada fertilidad y de uso ganadero extensivo (bovinos). Poseen pendientes escarpadas a muy escarpadas y afloramientos rocosos con poca pedregosidad en la superficie, con pendientes entre 30 a 60 %. Predominan texturas medias, con pH entre 5,5 y 7,5 en los horizontes superficiales.

Hacia el este, le siguen colinas formadas por suelos poco profundos a profundos, bien drenados y con fertilidad baja, con agricultura extensiva y actividad agrosilvopastoril (bovinos, caprinos, ovinos, en conjunto con cultivos de maíz, frijol, soja, etc.).

En algunos casos, en el subsuelo se presenta material calcáreo. Generalmente, son afectados por erosión laminar ligera a moderada, con una baja fertilidad y pendientes entre 2 y 8 %, aunque localmente las pendientes pueden alcanzar 30 a 60 %. El pH varía de 5,5 a 8 y no son salinos ni sódicos. Además, su contenido de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes son bajos.

El piedemonte está constituido por suelos profundos a muy profundos, bien drenados y con una moderada fertilidad, con uso agropecuario (ganado bovino y caprino y cultivos de maíz, soja y frijol) y tala selectiva. Los piedemontes están conformados por sedimentos provenientes de las partes altas de los contrafuertes del subandino, constituidos por material coluvio aluvial y transportados por agentes hídricos y eólico. Son áreas con pendientes

entre 0–5 %. Están afectados por erosión laminar ligera, bien a imperfectamente drenados en la parte distal del abanico, en contacto con la superficie de llanura. Son suelos con valores del pH variables entre 6 y 8,5 y no son calcáreos, salinos ni sódicos. La disponibilidad de nutrientes en general es baja.

Los afloramientos que se observan en esta unidad en la parte occidental están constituidos por rocas que corresponden a la provincia de subandino, la parte oriental corresponde a la llanura chaqueña. Las unidades formacionales aflorantes mapeadas comprenden el lapso Devónico Superior – Neógeno.

En Bolivia, esta unidad abarca distintos tipos de acuíferos:

- Acuíferos extensos y productivos: se trata de depósitos fluviales en cauces de ríos maduros Hsa(f). Involucra los aluviones del Holoceno del río Yacuiba.
- Acuíferos fisurados: se trata de recursos de agua subterránea, frecuentemente sólo presentes en profundidad. Incluyen los acuíferos carstificados.
- Acuíferos locales o discontinuos: de productividad moderada, sobre areniscas, tobas, domos y stocks de pórfidos del Jurásico; y areniscas, conglomerados, diamictitas, arcillas, calizas y yeso del Carbonífero.
- Acuíferos menores: aquellos con recursos de aguas subterráneas locales y limitados, sobre areniscas, lutitas gris verdosas y limolitas del Devónico y conglomerados; areniscas, lutitas, limolitas y arcillitas localmente yesíferas del Paleógeno y Neógeno; y depósitos de pedemonte del Holoceno. No se excluye que

existan acuíferos más productivos en profundidad.

Los aluviones de edad holocénica se encuentran en el valle de Yacuiba Hsa (Ya ubicado en la parte oeste de la llanura chaqueña, sobre la carretera Yacuiba – Villamontes. El área es una cuenca de 45 km de longitud en sentido norte-sur, por 3 km de ancho en sentido oeste-este, localizada en el extremo sudoeste del mapa. La misma se encuentra rodeada por las elevaciones terciarias en su flanco este y por los afloramientos subandinos de la serranía del Aguaragüe, en su flanco oeste.

El valle de Yacuiba ha sido rellenado en el Cuaternario por materiales producto de la erosión, transporte y depósito de los sedimentos paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos (terciarios) de las áreas colindantes. Consecuentemente, están conformados por material aluvial, como gravas, arenas y limos.

Los acuíferos existentes en la cuenca son de características semiconfinadas y confinadas, e incluso en sectores muy puntuales se han detectado acuíferos libres. Con la correlación estratigráfica de una serie de pozos ubicados sobre un perfil A-B de orientación nor-noroeste-sur-suroeste —tomando como representativos los N° 129, 121, 127 y 74—, se pudo comprobar la existencia de dos unidades hidrogeológicas con acuíferos semiconfinados de excelentes rendimientos y buena continuidad areal. Una primera unidad estaba compuesta por acuíferos cuyas potencias variaban entre 4 y 12 m, conformados por arenas medias a gruesas y algunos horizontes gravosos. Estos acuíferos se ubicaban a profundidades que oscilan entre los 30 y 55 mbs. Una segunda unidad estaba conformada por acuíferos de sedimentos más finos, en especial arenas finas a medias, ubicados entre 60 y 85 mbs, con potencias que variaban entre los 2 y 15 m.

También se han detectado en la ciudad de Yacuiba algunos pozos sugerentes, cuya agua es captada por diferentes niveles acuíferos. Éstos generalmente se componen de arenas y gravas. De los niveles captados, los más productivos son los que se ubican entre los 43-46 y 89-94 m de profundidad.

En la periferia de la misma ciudad, en el sector del aeropuerto, existen acuíferos superficiales de características libres, cuyo nivel estático se encuentra ubicado a profundidades que no superan los 5 mbs. En época de lluvias, en los meses de enero y febrero, este nivel asciende aún más, provocando en ciertas ocasiones anegamiento en los barrios marginales de Yacuiba.

Los perfilajes eléctricos efectuados sobre estas perforaciones han dado valores de resistividad eléctrica de las formaciones entre 100 y 150 ohmm para acuíferos potencialmente explotables. Se trata de excelentes valores si se considera que en gran parte del Chaco los acuíferos explotados poseen valores de resistividad eléctrica que no superan los 30 a 40 ohmm.

Los análisis químicos del agua subterránea obtenida de los diferentes pozos en el área del valle de Yacuiba indican un bajo contenido en sólidos totales disueltos (en comparación al agua subterránea del resto del Chaco), que no supera a los 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica y corresponde a la facies bicarbonatada magnésica.

A esta unidad hidrogeológica corresponde al área pedemontana de la faja de serranías terciarias y el sector comprendido entre las serranías de Caiza y las serranías de Ibibobo. Las características hidrogeológicas de ésta son muy parecidas a las del área de elevaciones terciarias (E.T.), pero la diferencia estriba en que los acuíferos semiconfinados y/o confinados están

constituidos por sedimentos más finos (generalmente arenas medias a finas y un alto porcentaje de arcillas).

Asimismo, en esta unidad hidrogeológica fue perforado el pozo N° 136 denominado San Antonio 2, realizado a través de la cooperación entre el proyecto CABAS-SERGEOMIN y la prefectura de Tarija. Las informaciones hidrogeológicas, hidroquímicas y sedimentológicas obtenidas a través de la perforación e investigaciones en el pozo indican que hasta los 189 mbs no se detectaron acuíferos de importancia. El perfil se encuentra integrado por una secuencia estratigráfica de capas con materiales predominantemente limo-arcillosos. El único acuífero que se detecta hasta esta profundidad se encuentra entre los 150 y 159 mbs y es de poca importancia hidrogeológica. A partir de los 189 mbbp, aparecen los primeros acuíferos económicamente explotables, cuyos espesores pueden alcanzar los 10 m. Los mismos tienen continuidad hasta los 244 m de profundidad —la alcanzada por la perforación— y están compuestos por arenas finas con intercalación de materiales arcillosos. Además, el perfilaje eléctrico de pozo realizado ha dado valores de resistividad eléctrica de las formaciones potencialmente importantes de entre 20 y 30 ohmm. El agua subterránea bombeada del pozo es dulce y de acuerdo a los análisis realizados, los parámetros determinados se encuentran dentro de las normas establecidas por la OMS para agua potable, salvo el catión sodio (Na^+), que excede levemente los límites permitidos. Finalmente, de acuerdo al diagrama de Piper, el agua es de características clorurada bicarbonatada sódica.

En Argentina, esta unidad se denomina Sierras Pampeanas y Subandinas y Piedemonte proximal de Sierras Pampeanas y Subandinas. Incluye las Cumbres de San Antonio, Sierras de Macueta y Tartagal

en Salta; Sierras de Guasayán en Santiago del Estero y Sierras Pampeanas en Tucumán (Sierras de Medina y de la Ramada). Las Cumbres de San Antonio, Sierras de Macueta y Tartagal están conformadas por areniscas deleznales, diamictitas, pelitas y areniscas subordinadas, además de rocas muy fracturadas.

Los afloramientos metamórficos en contacto con facies de yeso redepositadas situados en la provincia de Santiago del Estero alojan un acuífero libre, con baja $T= 46$ a 51.42 m^2/d y $S= 0.0414$. Su composición del agua es bicarbonatada sódica y presenta baja salinidad (<700 mg/l de RS) y alto F- (Martin et al, 1998).

En cuanto a las Sierras de Medina y la Ramada, son pizarras y filitas fuertemente diaclasadas, microfracturadas y microplegadas, que forman bloques peneplanizados limitados por corrimientos. Se extienden en el sector oeste del SAYTT argentino, entre los paralelos de 22° a 28° LS. Allí, predominan materiales muy heterogéneos, desde rocas con baja K a sedimentos permeables terciarios y cuaternarios.

En la provincia de Tucumán, la unidad comprende a la cuenca hidrogeológica de noreste o Burruyacu definida por Tineo (2000) y al ambiente hidrogeológico Borde Distal del Abanico Aluvial de las Sierras Subandinas, definido en la carta hidrogeológica de la provincia de Santiago del Estero (Martin et al, 1994). En la región tucumana, los sedimentos pleistocenos tienen una potencia aproximada de 100 m y predominan niveles de conglomerado, con niveles de arenas y gravas de buen espesor. En la zona, se destaca el cono aluvial del río Tajamar o Cajón, que permitió el depósito de niveles permeables portadores de agua subterránea en un amplio abanico de la llanura. Hacia el este, se encuentra la llanura baja, cuyos

límites coinciden en líneas generales para la zona de surgencia.

En las localidades de Benjamín Araoz y La Ramada, entre otras, se encuentran acuíferos profundos, con niveles por debajo de los 30 mbbp, excelentes caudales y buena calidad de agua. Allí se presentan un acuífero libre y un sistema de acuíferos confinados y semiconfinados, de variables espesores y discontinuos. El nivel piezométrico para niveles productivos de 70-100 m de profundidad es 15.5 m con CE de $709 - 2.888$ $\mu S/cm$, mientras que el nivel piezométrico para niveles productivos de 180 a 200 m es 18 m con CE 1.285 $\mu S/cm$. El agua es de tipo bicarbonatada/sulfatada y/o clorurada cálcica. Debido a su elevada permeabilidad, constituye área de recarga, cuya principal fuente son las lluvias.

3.3.2.6 Unidad VI. Chaco Aluvial, Paleocanales y río Pilcomayo

El Acuífero Aluvial está constituido por los numerosos acuíferos freáticos, que en Paraguay se extienden por todo al Chaco Deprimido o este de Chaco y están constituidos por arenas finas, que se presentan principalmente en las planicies de inundación de los numerosos ríos y riachos que desaguan en el río Paraguay. En Bolivia, se extienden por el Chaco boliviano, donde se encuentran en depósitos porosos no consolidados de productividad alta, ubicados preferentemente en los valles de Yacuiba, las terrazas y paleocauces del río Pilcomayo (cono aluvial del río Pilcomayo), depositados al pie de la cordillera y en la llanura chaqueña.

Por otra parte, acuíferos en rocas porosas no consolidadas de productividad moderada se encuentran con preferencia en los sedimentos de edad cuaternaria de la llanura chaqueña y las paleoterrazas del cono aluvial del río Pilcomayo. Éstos abarcan

depósitos fluviales en cauces de ríos maduros de edad holocénica sedimentaria aluvial, Hsa(f), y se encuentran en el cauce actual del río Pilcomayo, que drena desde la cordillera oriental de Los Andes, atraviesa el Subandino y llega a la llanura chaqueña, en dirección sureste. En general, en los cauces de estos ríos, existen acuíferos productivos cuya agua es extraída mediante obras hidráulicas para diferentes usos. Estos acuíferos generalmente son sub-superficiales y productivos por la constante recarga del agua superficial y son considerados en este grupo por su gran productividad.

Al pie del Subandino y en los flancos del río Pilcomayo, se ha formado un sistema de terrazas (t1-t2), generadas por el mismo río, que están ubicadas entre la localidad de Villamontes y el puesto militar de Ibibobo. En este tramo, se ha identificado una terraza superior (t2), cuya potencia promedio es de 8 a 10 m, compuesta esencialmente por una base de gravas cuarcíticas en medio de una matriz areno-limosa, donde suprayace una capa de 2 a 3 m de suelo vegetal. Esta terraza puede observarse en plenitud sobre la margen derecha del río Pilcomayo, a la altura de la ciudad de Villamontes. La terraza inferior (t1) está compuesta por gravas en medio de una matriz limosa.

En el sector de terraza, las perforaciones no superan los 100 m de profundidad, con presencia de acuíferos libres de buenos rendimientos específicos (aprox. 3 l/s), cuyo nivel estático no sobrepasa los 25-30 mbs. Los acuíferos están constituidos por materiales gruesos (arenas y gravas), propios de sedimentos aluviales y existen depósitos fluviales en cauces de ríos antiguos Hsa (Pc).

En la parte distal del sistema de terrazas del río Pilcomayo y sobre la llanura aluvial del Chaco tarijeño, existen paleocauces de edad holocénica sedimentario aluvial Hsa

(pc). Estos depósitos son de origen fluvial y están formados por gravas, arenas y arcillas; en general, forman acuíferos productivos en la zona. A este grupo pertenecen los Paleocanales del cono aluvial del río Pilcomayo del Holoceno sedimentario aluvial Hsa (pc), que están ubicados dentro del cono aluvial del río Pilcomayo. Éstos han sido identificados como áreas con condiciones hidrogeológicas e hidroquímicas favorables para la explotación de aguas subterráneas, similares a las terrazas del río Pilcomayo.

Los sectores identificados como paleocanales topográficamente son más bajos que el resto del área, en el Chaco. Estos desniveles son conocidos como “cañadones o cañadas” y, en el sector mencionado, se pueden identificar algunos de importancia, como las cañadas Bolívar, Quirquincho, Las Moras, Las Bayas y Pajarito. Estas geoformas tienen una pendiente regional hacia el este de aproximadamente 1 a 2 % y son receptoras del agua meteórica. Una capa relativamente impermeable en la superficie provoca que, en ciertas épocas de lluvias, grandes volúmenes de agua se acumulen en estos sectores. Se ha comprobado mediante estudios geofísicos y de perforaciones que las mejores condiciones para la obtención de agua subterránea, tanto en cantidad como calidad, se presentan en los paleocanales y áreas colindantes. Puede identificarse una franja de 300 a 500 m a ambos lados de estas depresiones, de buenas condiciones hidrogeológicas e hidrogeoquímicas. Los pozos N° 94 “Establecimiento”, N° 95 “La Esperanza” y N° 96 “El Pato” son un claro ejemplo de lo expresado. La interpretación de los SEV ejecutados en estos sectores ha determinado que las resistividades eléctricas de las formaciones potencialmente explotables no superan los 30 ohmm (Fiehlitz et al, 1994).

Los acuíferos del área son de características libres, lenticulares e interdigitados, compuestos por arenas finas a medias y algunos horizontes de gravas. En la cañada Bolívar, los mejores acuíferos se ubican por debajo de los 65 mbs. En la cañada Quirquincho, los acuíferos han sido detectados a partir de los 35 – 40 m de profundidad, con espesores que oscilan entre los 6 y 20 m. El agua subterránea del sector no supera los 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica y según el diagrama de Piper, corresponde a la facies bicarbonatada magnésicas y sulfatada cloruradas.

En Argentina, la unidad se extiende a ambos lados del actual cauce del río Pilcomayo y se desarrolla en dirección preferentemente oeste-este a noroeste-sudeste. Comprende al Complejo Acuífero Pilcomayo (S.P.A.P., 2010) y está conformada por sedimentos fluviales compuestos por arenas medianas y finas y limos, con intercalaciones arcillosas-limosas de escasa continuidad areal. Esta cubierta moderna alcanzaría su máximo espesor en la zona de influencia directa del río Pilcomayo, con unos 50 m y a medida que se aleja de este área, se produce un adelgazamiento progresivo de la misma, hasta no superar los 30 m (S.P.A.P., 2010). Asimismo, presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos semiconfinados a confinados de variable potencia.

En la zona oeste, en la provincia de Salta, los niveles piezométricos muestran que el flujo de todos los niveles acuíferos (sistema multicapa) tiene un componente preferencial que coincide con la dirección del cuerpo superficial (García, 1998 y 1999). Respecto a la geofísica, se realizó un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) en la localidad de Vaca Perdida, que registró la capa de interés hidrogeológico entre los 15 y 40 m, con resistividad eléctrica de 45 ohmm. En el sector Chaco Boreal salteño (García, 1998 y 1999), el acuífero libre tiene un $Q_e = 4$ y $10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$

y una $T = 290$ y $120 \text{ m}^2/\text{d}$ (inmediaciones del río Pilcomayo) y un $Q_e = 0.75$ y $1.3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ y $T = 22$ y $40 \text{ m}^2/\text{d}$ (zonas alejadas del río). Para el sistema confinado/semiconfinado, la $T = 8$ y $50 \text{ m}^2/\text{d}$ (S.P.A.P., 2010).

En la región oeste de Formosa y noreste de la provincia de Salta, Sánchez (2007) identifica un acuífero correspondiente a un sistema de paleocauces cuaternarios entre las localidades de El Chorro y Vaca Perdida – Pozo Maza con varios niveles productivos. El nivel productivo situado entre los 15 a 43 m son arenas finas a medianas con intercalaciones de limo a limo-arcilloso, pardo claro y calcáreo. La resistividad eléctrica a partir de los 15 a 16 m de profundidad es de 40 a 70 ohmm, indicando la presencia de agua dulce. La profundidad del nivel freático medido en el pozo FA08 (Vaca Perdida) a 29 m de profundidad fue de 12 m, con un $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$. La composición química del agua es sulfatada/bicarbonataba sódica. La CE medida en varios pozos en dicha localidad (FA06, FA07, FA08) oscila entre 900–1.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la principal fuente de recarga son las precipitaciones. Asimismo, el río Pilcomayo actúa como influente en varios sectores de la llanura. En algunos casos, se presentan condiciones de confinamiento local que contienen agua salada, mientras que el agua de buena calidad se encuentran en cantidades limitadas, flotando sobre el agua salada, debido a que la velocidad de circulación horizontal es mayor que la velocidad de difusión de las sales, producto de áreas de inundación de ríos. Estos acuíferos freáticos son mencionados para entendimiento del contexto regional del Piso Hidrogeológico Chaco.

Por su parte, el acuífero Paleocanal se encuentra rellenado por sedimentos de edad Cuaternaria Holocena– Pleistocena. Los paleocanales fueron formados por el

río Pilcomayo cuando éste se encontraba en el Chaco Central. Posteriormente, fue desviándose para el sur, debido principalmente a la colmatación de sus canales hasta la posición actual. Los extensos paleocanales del Chaco Central son potencialmente favorables para el almacenamiento del agua de lluvia. El único recurso de agua subterránea en la zona lo constituyen los lentes o bolsones en el acuífero Paleocanal, los cuales contienen agua dulce (≤ 1000 ppm) a salobre (de 1000 a 10000 ppm) en ambientes de agua salada (mayor a 10000 ppm). Las aguas dulces se presentan flotando en ambiente de aguas salobres a saladas en forma de bolsones con dimensiones definidas. Esto ocurre donde las condiciones son favorables (suelo y sub suelo permeables) para la infiltración natural en depresiones o mediante la recarga artificial del agua de lluvia, formando los lentes. El nivel freático varía entre 14 m hacia el oeste de la Colonia Neu Halbstadt (Neuland) y 5 m al este de Loma Plata.

Schuman & Centurion (1998) procesaron datos técnicos de los acuíferos freáticos (arena, arena limosa) con el fin de determinar parámetros hidráulicos representativos del Chaco Central (Suroeste Filadelfia), donde la conductividad hidráulica representativa es de entre $2,05 \cdot 10^{-4}$ m/s y $8 \cdot 10^{-4}$ m/s. En Loma Plata, se asume una conductividad hidráulica de $2,7 \cdot 10^{-5}$ m/s y en Filadelfia, de $1 \cdot 10^{-4}$ m/s correspondiente a la arena fina. Considerando un gradiente de $1,4 \cdot 10^{-4}$ y una porosidad eficaz de 0,1, resultan en un velocidad real de 1,2 a 4,4 m/s a nivel de la freática.

3.3.2.7 Unidad VII Abanico Aluvial del Intiyuro

Esta unidad se implanta sobre sedimentos arenosos y pelíticos con alto contenido de materia orgánica, con grava en posiciones proximales.

En Bolivia, abarca la zona limitada al sur con la frontera de Argentina; al oeste, con las serranías de los afloramientos terciarios; y al este, con el cono aluvial del río Pilcomayo. En general, las condiciones para la extracción de agua subterránea tanto en cantidad como calidad son bastante favorables en toda el área, sobre todo en los sectores atravesados por las cañadas que provienen de las serranías terciarias próximas. Los SEV realizados sobre estos cauces semipermanentes han dado valores de resistividad eléctrica de las formaciones de entre 35 y 40 ohmm, lo que se registra incluso hasta los 165 m de profundidad (Fielitz et al, 1994).

Mediante la descripción litológica de algunos perfiles de pozos, se han podido identificar dos unidades hidrogeológicas de buena continuidad regional, lo que puede observarse claramente en el pozo N° 103 “La Burra”, cuyas características exhiben una primera unidad, compuesta por acuíferos semiconfinados, ubicados entre 70 y 107 mbs y que se componen básicamente por arenas medias a gruesas, intercaladas por acuitardos de arena fina y arcilla y una segunda unidad, compuesta por acuíferos semiconfinados y/o confinados, ubicados por debajo de los 115 m de profundidad y que se componen por arenas finas a medias, con algunas intercalaciones de gravas. Ambas unidades se hallan separadas por una capa arcillosa de entre 6 y 10 m de potencia, que se generaliza en toda el área. Según los análisis químicos efectuados sobre las muestras de agua subterránea del área, ésta es de características sódicas bicarbonatadas sulfatadas, con valores superiores al 50% de meq/l en el valor del catión sodio.

En Argentina, esta unidad se extiende en el sector nor-noreste de la provincia de Salta y comprende a los depósitos del abanico

aluvial de Intiyuro y proximal del Bermejo. Allí, se presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos confinados y semi-confinados de variable espesor. En la facie proximal, se encuentra a unos 40 km al norte de la ciudad de Tartagal y allí predominan gravas y sábulos con alta K y T. En la facie media, dominan arenas medianas o gruesas con alta-media K y T. El nivel piezométrico para el nivel productivo de 170 a 193 m de profundidad es 12.96 a 16.7 m y la CE 1.030 – 3590 $\mu\text{S}/\text{cm}$), y el agua es de tipo sulfatada sódica. La facie distal se caracteriza por arenas finas a muy finas, limos y arcillas. El nivel piezométrico para el nivel productivo de 80 m es 15.62m con $Q=3\text{m}^3/\text{h}$ y $Q_e= 0.267\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ con CE de 566 a 1.350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y $\text{pH}=7.6$ a 8, con agua de tipo sulfatada/bicarbonatada sódica. Para el nivel productivo a 180 m de profundidad, el nivel piezométrico es 68,28m y la CE es de 1.205 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el agua es de tipo sulfatada sódica.

Los sectores de recarga se encuentran en las facies proximales y media del abanico y la principales fuentes son las lluvias y el régimen influente de los ríos Intiyuro, Bermejo y Pilcomayo.

3.3.2.8 Unidad VIII: Interfluvios

Esta unidad se implanta sobre depósitos recientes de ríos, arroyos, lagunas y esteros constituidos por arena, limo, arcilla y grava. Se extiende de este-este a noroeste-sudeste en la zona de interfluvio de los ríos Bermejo y Pilcomayo y entre el actual bañado La Estrella y el antiguo cauce del río Pilcomayo y comprende al Complejo Acuífero Interfluvios (S.P.A.P., 2010). Algunas de las localidades comprendidas en esta UH son Ingeniero Juárez, Bazán, Las Lomitas, Pozo del Tigre, Comandante Fontana, entre otras.

Predominan en ella los niveles arenosos sobre los arcillosos, con una frecuencia importante de horizontes areno-limosos a areno-arcillosos de origen fluvial-coluvial-eólica de edad cuartaria. La potencia media es de 30 m a 50 m (S.P.A.P., 2010). La unidad presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos semiconfinados a confinados de variable potencia.

En la planta de bombeo en la ciudad de Ingeniero Juárez, existen facies sedimentarias semiresistivas asignada a arena, saturadas con agua dulce entre los 18 y 100 m. Los pozos censados en esta planta (PFA09 y PFA18) con una profundidad medida entre 20 y 30 m presentaron una profundidad del nivel piezométrico a 16 m. El agua es de tipo sulfatada xódica y alta CE 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Hasta la actualidad, el número de perforaciones efectuadas con criterio hidrogeológico es insuficiente, pero se estima que el flujo subterráneo tiene una componente noroeste a sudeste, motivo por el cual se recomienda analizar nuevas perforaciones para una mejor caracterización del flujo subterráneo. Los niveles estáticos para pozos de 14 a 23 m de profundidad son de 2,66 m y de 16,09 m y $Q_e=1,3$ a $3\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ y $Q=10$ a $28\text{m}^3/\text{h}$. En esta unidad hidrogeológica, los acuíferos portadores de agua dulce normalmente son verdaderos paleocauces, que son muy difíciles de identificar. De esta manera, a veces la única manera de localizar estos reservorios es a través de prospección geofísica.

Una característica importante es la variación temporal de la composición química del agua subterránea. En muchos sectores, el agua dulce flota sobre el agua salada a modo de islas, de manera que presenta caudales de explotación limitados. En general, contienen aguas saladas a salmueras.

Los pozos censados en las localidades de Las Lomitas e Ing. Juárez (FA04, FA09) son de tipo sulfatada bicarbonatada sódica. La CE medida fue de 1.400 a >2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La principal fuente de recarga son las precipitaciones. Asimismo, el río Pilcomayo y Bermejo actúan como influentes en varios sectores de la llanura.

3.3.2.9 Unidad IX Ambiente fluvial del río Bermejo

Esta unidad se extiende hacia ambos lados del actual cauce del río Bermejo y su área de influencia, en dirección oeste –este a noroeste– sudeste y en el área de influencia del río Paraguay. Comprende al complejo Acuífero Bermejo y el Acuífero Pucú (S.P.A.P., 2010).

En ella, predomina una alternancia de arenas finas a muy gruesas de color pardo amarillento a pardo rojizo claro, cuarzosas, subrredondeadas a redondeadas, con regular a buena selección. Se intercalan lentes de arcillas pardas rojizas y plásticas y los niveles de gravas son finos a grueso con lentes de arcillas. El espesor de estos sedimentos cuaternarios (Fm Pampa) es variable entre 30 y 130 m y decrecen de oeste a este. De esta manera, el espesor de estos sedimentos se reduce abruptamente al alejarse de la zona de influencia del río Bermejo.

Asimismo, la unidad presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos semiconfinados a confinados de variable potencia, facies y desarrollo areal.

En la localidad Misión Yacaré Viejo, se destacaron dos niveles acuíferos entre los 8 -12 a 31 m y 33 a 44 m, que corresponden a facies de arenas medianas a finas. Los caudales oscilan entre 6,98 m³/h a 12,5 m³/h y sus caudales específicos son de 0,468 m³/h/m a 6,7 m³/h/m.

La conductividad del agua es de 1.470 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y es agua apta para consumo (S.P.A.P., 2010). Debido a que los datos de niveles piezométricos son insuficientes para realizar un mapa isopiécico, se considera que el río Bermejo es influente, característica que se pierde a medida que se aleja del cauce principal. Las profundidades del nivel freático oscilan entre 6 a 20 m y el agua es de tipo bicarbonatada sódica.

De acuerdo a S.P.A.P. (2010), la principal fuente de recarga para estos acuíferos es el río Bermejo, que se comporta como influente a lo largo de casi toda su extensión. De esta manera, los mejores acuíferos portadores de buena calidad de agua estarían cercanos al cauce del río. La zona de recarga estaría en la cuenca alta del río Bermejo y la fuente de recarga también son las lluvias.

En el sector oriental cercano al río Paraguay, esta unidad está comprendida en la Fm Pampa, constituida principalmente por arenas medianas, cuarzosas, blanquecinas, muy bien seleccionadas con niveles de arenas gruesas a gravas muy finas de ambiente fluvial. El espesor de estos sedimentos cuaternarios puede alcanzar los 70 m (Perf. Mariano Boedo) y su parte basal suele estar representada por una arcilla carbonática de color gris oscuro. Aquí presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos semiconfinados a confinados de variable espesor.

En la localidad de Herradura (Formosa), existe un nivel acuífero cuya base se extiende desde una profundidad de 30 m hasta 60 m aproximadamente, con valores de resistividad alta a moderada (30 a 100 ohmm). En este sector de la provincia, se encuentran el caudal específico (Qe) más alto de los reservorios subsuperficiales, con caudales de explotación mayor a 70 m³/h.

La transmisividad (T) para el acuífero libre varía entre 130 y 250 m²/d (SPAP, 2010). El (Qe) es de 1,4 y 5,4 m³/h/m y con caudales de explotación elevados (25 a 50 m³/h). La dirección del flujo subterráneo es noroeste-sudeste, con niveles piezométricos (NP) de 3 a 11 m en los sectores cercanos al río Paraguay. El agua es de tipo bicarbonatada/sulfatada sódica. La conductividad eléctrica (CE) es de 743 a 3.530 µS/cm y pH=6-8, con algunas limitaciones en el uso. La principal fuente de recarga para este acuífero es la precipitación. La mayoría de los cuerpos superficiales son efluentes y los sitios de recarga preferencial coinciden con las partes altas (lomas o divisorias) de las respectivas subcuencas.

3.3.2.10 Unidad X: Alto chaqueño y abanicos aluviales

Esta unidad hidrogeológica se compone de varios ambientes, que se describen a continuación.

En primer lugar, se identifica el ambiente de planicie poligenética, que se extiende en el sector sudeste del Chaco. Éste presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos semiconfinados a confinados de variable potencia, facies y desarrollo areal. Se trata de sedimentos fluvio-eólicos (fluvial-loésicos) con niveles de arenas medianas a finas. La potencia es de ~100 m y el espesor de los niveles productivos varían de 2 a 8 m. El nivel de 53 a 59 m presenta un Q= 4 m³/d y el nivel piezométrico es de 50.13 m. No existe información hidrogeológica ni pozos en el área de estudio.

En segundo lugar, se destaca la Lomada de Otumpa, que se localiza en el Chaco occidental y este de Santiago del Estero. Se trata de depósitos loésicos retrabajados cuaternarios. Ésta presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos semiconfinados a

confinados de variable potencia. No existe información hidráulica de los sedimentos cuaternarios en esta unidad hidrogeológica. En esta unidad, se encuentran aflorando areniscas eólicas finas a gruesas, bien redondeadas, con estratificación entrecruzada de alto ángulo y superficies de truncamiento múltiple correspondientes a la formación Botucatú de edad jurásica.

En la Mesopotamia y especialmente al sur de Brasil, posee vasta distribución geográfica en superficie y subsuelo, constituyendo uno de los más importantes acuíferos transfronterizos denominado Acuífero Guaraní. Sin embargo, se desconocen las características acuíferas en el sitio de estudio y no existe información del comportamiento hidráulico en este sector.

Se resolvió incluir esta unidad en el mapa hidrogeológico a pesar de su escasa expresión areal superficial, de manera de tener una visión más abarcadora sobre la delimitación del SAYTT. Ésta constituye una ampliación del área de estudio, porque existen lomadas pliocenas aflorando que son potencialmente una zona de recarga.

En tercer lugar, se identifica al antiguo abanico del río Salado, que se extiende sobre la llanura semiárida de Santiago del Estero y comprende a los ambientes hidrogeológicos de paleocauces del río Salado y Facies Calcáreo – Limosas, definidos en la carta hidrogeológica de la provincia de Santiago del Estero (Martin et al., 1994). Esta unidad comprende un ambiente de paleocauces con texturas predominante de arenas finas que constituyen buenos reservorios de agua dulce local con alta T y porosidad eficaz (me). En algunos casos, presentan lentes de agua dulce sobre agua salada, otorgando una composición de mezcla del agua subterránea.

Asimismo, los paleocauces, por su relieve deprimido, reciben recarga directa inducida de represas locales. El ambiente de Facies Calcárea Limosas presenta una escasa variabilidad litológica, formado por sedimentos cuaternarios.

El agua freática está condicionada a las precipitaciones y se acumula sobre lentes arcillosos impermeables, en la base de la Fm Pampa. En otros casos, se encuentran aguas dulces sobre mantos acuíferos fuertemente salinizados, separados por diferencia de densidad. Las aguas subterráneas se caracterizan por tener alta salinidad ($> 45.000 \text{ mg/l}$) y son principalmente cloruradas sódicas y sulfatadas cálcicas o magnésicas inaptas para consumo con salinidades inclusive superiores a 45.000 mg/l (Martin, et al. 1998). Los caudales de explotación son bajos, se agotan cuando son sometidos a intenso bombeo en ambos ambientes y no existe información hidráulica en el área de estudio.

La principal fuente de recarga son las precipitaciones y los sectores locales de recargas como las depresiones o cubetas (Martin et al, 1999).

En cuarto lugar, puede mencionarse el Abanico Proximal y Medio del río Salado. El sector proximal o ápice del abanico aluvial del río Salado se desarrolla próximo a la ciudad de Joaquín V. González, situada en la provincia de Salta y penetra por el centro-norte en la planicie semiárida santiagueña y en la región oeste del Chaco (Impenetrable). Comprende parcialmente al ambiente hidrogeológico denominado Borde Medio y Distal del Abanico Aluvial del río Salado definido en la carta hidrogeológica de la provincia de Santiago del Estero (Martin et al., 1994).

La granulometría del abanico decrece exponencialmente desde su parte proximal

– media hacia el borde distal y presenta una morfología lenticular. En el sector proximal, predominan gravas y sábulos con alta K y T, que constituyen potenciales áreas de recarga, y arenas medianas a gruesas. El sector medio del abanico aluvial está constituido por arenas medianas a gruesas que en muchos casos son compactadas y cementadas por efecto de percolación de los acuíferos suprayacentes.

Respecto a la geología estructural, el abanico aluvial está interrumpido al este por el arco estructural “Dorsal El Caburé” (Padula y Mingramm, 1963), el cual sirve como barrera natural de las aguas subterráneas y pone en contacto capas de distintas características geológicas (Martin et al., 1999). Presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos semiconfinados a confinados de variable espesor en sedimentos cuaternarios y terciarios. El nivel piezométrico para los niveles productivos a 120 m, 140 m y 230 m varía de 8,26 a 14,73 m. El caudal de explotación es aproximadamente de $49 \text{ m}^3/\text{h}$ y el caudal específico es de $2.88 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

La composición química del agua es de tipo bicarbonatada/sulfatada sódica. La CE medida in situ es de 655 a $1.600 \mu\text{S/cm}$ y $\text{pH}=8-9$ y alto As (0.024 a 0.909 mg/l) pozos P14 y P41 (Monte Quemado).

Esta unidad hidrogeológica constituye un ámbito de recarga para los acuíferos y la principal fuente de recarga son las precipitaciones.

Respecto del Abanico distal del río Salado, se extiende principalmente en la región oeste del Chaco (Impenetrable). Allí predominan importantes intercalaciones de arenas finas a muy finas y depósitos de limo-arenosos con niveles de tosca. Éste presenta acuíferos libres y semiconfinados

a confinados de variable espesor en sedimentos Qt y Tc de alta salinidad. Esta distinción en los cambios composicionales del agua subterránea coincide con una interrupción abrupta de la sedimentación como consecuencia del arco estructural “Dorsal El Caburé” (Martin, et al., 1999). Asimismo, el contenido de ceniza volcánica, portador de trizas de vidrio en los sedimentos contenidos principalmente en este ambiente, es la principal fuente de contaminación natural de arsénico en los acuíferos profundos. De esta manera, son aguas con altos contenidos en As (Martin et al, 1999).

No existe información hidráulica en el área de estudio. Además, esta unidad hidrogeológica es el único caso que constituye principalmente un ámbito de descarga de los acuíferos, con recargas locales e infiltración vertical descendente a partir de niveles de acuitardos presentes en los sedimentos cuaternarios, que constituyen acuíferos subyacente semiconfinados. La principal fuente de recarga son las lluvias.

Con relación al Abanico del río del Valle, se desarrolla desde la cercanía de la ciudad de Pichanal (sector proximal) extendiéndose hacia el sur, hasta la ciudad Las Lajitas (sector distal), correspondiente al sector central de la provincia de Salta. En la facie proximal, predominan gravas y sábulos con alta K y T; arenas medianas a gruesas en las facies media y arenas finas a muy finas en el sector distal. Éste presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos confinados a semiconfinados de variable espesor. No se encontraron perforaciones profundas en las facies proximales – medias. El nivel freático registrado en el P36 para un nivel productivo a 25 m de profundidad es de 20 m.

La composición química del agua es sulfatada/bicarbonatada sódica y la CE de 1.900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para el sector distal (P38 y P39) y

nivel productivo a 120 m, el agua es sulfatada/bicarbonatada sódica y bicarbonatada cálcica respectivamente. La CE oscila entre 780 y 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$. No existe información del comportamiento hidráulico en los acuíferos.

El sector proximal y medio constituyen áreas de recarga. La principal fuente son las precipitaciones.

Con respecto al Abanico de Sierra de la Candelaria, éste se extiende principalmente en el sector oeste-noroeste de la provincia de Santiago del Estero. Comprende al ambiente hidrogeológico de Cono Aluvial del río Horcones, definido en la carta hidrogeológica de la provincia de Santiago del Estero (Martin et al, 1994).

El río Horcones nace en el faldeo oriental de las serranías de Carahuasi (provincia de Salta) y luego de recibir algunos afluentes, penetra en la provincia de Santiago del Estero, donde infiltra gran parte de su caudal, dando origen a numerosas lagunas y bañados. De esta manera, este río se insume en la llanura semiárida a causa de sus caudales intermitentes y a la elevada evaporación.

Predominan allí capas de rodados e intercalaciones limosas con $K= 700 \text{ m/d}$, $T= 596 \text{ m}^2/\text{d}$ y $S= 0.003$. El área presenta un acuífero libre y un sistema de acuíferos confinados y semiconfinados de variable espesor. El nivel productivo a 100 y 192 m de profundidad posee un caudal de explotación de $Q= 6-12.5 \text{ m}^3/\text{h}$. El caudal específico es de $2.3 \text{ m}^3/\text{h/m}$ y los niveles productivos de 220 y 228 m son surgentes. El agua es de tipo sulfatada sódica con CE de 1.155 a $3.620 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $\text{pH}=8$ medidos en los pozos P9 y P10. Asimismo, el agua presentó altas concentraciones de As y B.

El sector proximal y medio constituyen áreas de recarga. La principal fuente son

las precipitaciones y el régimen influente del río.

En cuanto al Abanico de Guasayán, se extiende en el sector pedemontano de la Sierra de Guasayán y comprende al ambiente hidrogeológico de Facies de Yeso Redepositadas definido en la carta hidrogeológica de la provincia de Santiago del Estero (Martin et al, 1994). Éstas constituyen lomadas miocenas (Fm Guasayán), en las cuales predominan arcilitas verdes con intercalaciones de bancos de yeso.

Éste presenta acuíferos pobres a muy pobres, fuertemente salinizados, donde domina el ion sulfato y cloruro. Las concentraciones altas de sulfatos son $> 3.500 \text{ mg/l}$ (Martin et al, 1999). No presentan interés hidrogeológico y no se encontraron perforaciones en esta unidad hidrogeológica.

Los sectores de recarga se encuentran en las facies proximales y media del abanico y la principal fuente son las lluvias.

El Cono aluvial del río Salí se extiende en la llanura tucumana hasta el límite con Santiago del Estero. En la provincia de Tucumán, comprende a la cuenca hidrogeológica de la Llanura Oriental definida por Tineo (1999). Esta cuenca hidrogeológica es una de las más importantes de Argentina, por presentar acuíferos confinados de excelente rendimiento y calidad de agua. Asimismo, en este ambiente se existen máximas precipitaciones, superando a 1.500 mm .

Aquí se encuentran facies de abanicos cuaternarios. La facie proximal, ubicada entre la Banda del río Salí y San Andrés, presenta niveles de gravas gruesas a conglomerádica con alta K y T y espesores productivos entre 70 y 150 m con acuíferos de buen rendimiento. La facie media se ubica entre El Bracho-Mancopa hasta Aguas del Azul y

Cañada de Viclos, con espesores que superan los 300 m de profundidad. Son arenas gruesas y gravas con alta-media K y T, con intercalaciones de limo-arcillosas rosadas que le confieren confinamiento.

En esta zona, hay niveles de surgencia natural por debajo de los 80 m de profundidad. En El Bracho, una perforación a 300 m de profundidad, se presentó un caudal de explotación $Q=220 \text{ m}^3/\text{h}$ y a 200 m de profundidad el caudal fue de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (surgente). La composición química es sulfatada sódica con una CE medida en P4 de $2.520 \text{ }\mu\text{S/cm}$. En la facie distal, predominan arenas finas, limos con acuíferos surgentes de menor caudal de explotación, mientras que en la zona más baja de la cuenca, se encuentran los potenciales hidráulicos mínimos (zona de descarga) con alta salinidad.

Debido a su elevada permeabilidad, constituyen área de recarga las facies proximal y media y su principal fuente son las lluvias.

Con relación a la cuenca hidrotermal de río Hondo, ésta se extiende al oeste de Santiago del Estero, en el límite con Tucumán. Comprende al ambiente hidrogeológico de Borde Distal del Abanico Aluvial de las Sierras del Aconquija, definido en la carta hidrogeológica de la provincia de Santiago del Estero (Martin et al, 1994).

Predominan en ella sedimentos con permeabilidad hidráulica media y se presenta un acuífero libre en sedimentos cuaternarios y acuíferos confinados y semiconfinados pliocenos, miocenos y carboníferos. En los acuíferos del Cuaternario, predominan facies de gravas, arenas fluviales de 120 m de espesor con altos rendimientos $Q=5.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Las lentes arenosas pliocenas poseen espesor variable y escaso desarrollo lateral. Éstas presentan acuíferos con $Q= 6.000 \text{ m}^3/\text{d}$ a $4.800 \text{ m}^3/\text{d}$ y Q

(extremos) = 24.000 m³/d y la K decrece hacia el este.

La dirección de flujo subterránea es de este-sudeste (Jurío et al, 1975) y su calidad de agua es limitada, bicarbonatada sódica con alto F⁻ (>3,5 mg/l) (Martin et al, 1998).

Las zonas de recarga está en los abanicos aluviales al pie de las Sierras de Aconquija, donde el agua se infiltra y transita por el subsuelo de la llanura tucumana adquiriendo temperatura por escala geotérmica. Otro sector de recarga son los afloramientos de la Fm Las Cañas de edad pliocena existentes en los bordes de la Sierra de Guasayán, constituidos por areniscas arcílicas y margas pardas rojizas, con bancos arenosos sin extensión lateral. Desde el punto de vista mineralógico, presentan vidrio volcánico que provee cantidades de flúor a los acuíferos de las zonas de las Termas del río Hondo.

Finalmente, se identifica la Terraza y Planicie Actual del río Salado, que se extiende principalmente en la provincia de Santiago del Estero. Se trata de sedimentos fluviales de la planicie actual del río Salado. Ésta presenta acuíferos libres y semiconfinados de bajo rendimiento, con niveles productivos a 12 m de profundidad que presentan alta CE= 4.555 µS/cm, alto As y B. La composición del agua es de tipo sulfatada sódica. Para un nivel productivo a 162 - 167 m de profundidad, el caudal de explotación es de 4,5 a 7,2 m³/h. No existe información hidráulica en el área de estudio

3.3.3 Resultados y conclusiones de la integración

A partir del estudio de las características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas y geoquímicas del área comprendida por el proyecto SAYTT, se ha llegado a una serie

de conclusiones generales que se detallan a continuación.

El SAYTT constituye un sistema conformado por complejos acuíferos de edad terciaria y cuaternaria. Los primeros se encuentran constituidos por niveles confinados y semiconfinados, en donde predominan sedimentos limoarenosos y arenas cuarzosas de edad paleógena y neógena. Los acuíferos cuaternarios, por su parte, se encuentran relacionados principalmente con abanicos aluviales de extensión regional, como los de los ríos Intiyuro, Pilcomayo, Bermejo, Salado y Dulce y parte del paleoabanicos del río Parapetí. Estos acuíferos presentan niveles libres, semiconfinados y confinados, con espesores que en sectores cercanos a las sierras del oeste del área pueden alcanzar los 150 m y donde los niveles productivos se encuentran ubicados entre los 70 y 150 m de profundidad.

Los acuíferos terciarios que se encuentran bajo explotación corresponden a depósitos del Mioceno superior-Plioceno, en el sector oeste del área de estudio y a depósitos continentales del Oligoceno-Mioceno Medio, en la zona geográfica del Chaco. Estos últimos se pueden encontrar por debajo de las secuencias marinas del Mioceno medio en algunos casos o, en aquellos sectores en donde los sedimentos marinos no están presentes, en secuencias del Mioceno superior-Plioceno.

El sentido del flujo lateral regional de los acuíferos cuaternarios es noroeste-sudeste, con potenciales hidráulicos máximos de 300 m en el sector occidental, en donde se produce la recarga, disminuyendo a 50 m hacia el sector oriental en la zona del río Paraguay.

En el caso de los acuíferos terciarios, se pudo trazar un perfil geoquímico en sentido general noroeste-sudeste a la altura del

río Bermejo. En este sector, las aguas siguen una evolución geoquímica natural en el sentido del flujo, que va desde aguas bicarbonatadas sódicas y cálcicas (en áreas pedemontanas) a sulfatadas sódicas y cloruradas sódicas en el área de llanura, sugiriendo que la zona de recarga se encontraría en el sector serrano en donde afloran depósitos terciarios. Se recomienda analizar nuevas perforaciones para una mejor caracterización del flujo subterráneo.

La calidad de las aguas es muy variable dentro del área de estudio. Las aguas de los acuíferos terciarios presentan marcado gradiente en su salinidad, en sentido general oeste-este. En los sectores pedemontanos del oeste, se detecta una excelente calidad con valores de conductividad eléctrica inferiores a los 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Luego, hacia la zona de llanura, hay un incremento de la salinidad, observándose una facies salina sulfatada sódica con una conductividad eléctrica entre 1.000 y 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que aún permiten que los acuíferos sean explotados para algunos usos como el riego con precaución. Hacia el oeste de la provincia de Santiago del Estero y la región central de la provincia del Chaco, los valores de conductividad aumentan por encima de los 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ingresando dentro de una facies salina clorurada sódica que impide su utilización.

En los acuíferos cuaternarios, la salinidad suele ser baja en los ambientes hidrogeológicos vinculados al pedemonte de las sierras del oeste, áreas fuertemente onduladas y fajas fluviales-abanicos proximales, en las que conductividad eléctrica no supera en general los 1.000 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hacia los sectores distales de los abanicos, en los sectores de mayor evapotranspiración, crecen los valores de conductividad eléctrica, registrándose conductividades por arriba de los 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En general, se tratan de aguas aptas para el riego aunque, en el caso de los pozos en donde se observaron conductividades eléctricas superiores a los 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, deberán tenerse en cuenta las restricciones pertinentes. Sin embargo, un problema de relevancia en la calidad de las aguas de los acuíferos dentro del área de estudio es el elevado contenido de arsénico que presentan numerosos pozos en la región. Por eso, se recomienda un muestreo extensivo y monitoreo de este elemento

El análisis isotópico (oxígeno y deuterio) en las zonas analizadas en Argentina permite apoyar la hipótesis de que los acuíferos terciarios y cuaternarios estarían siendo recargados en los sectores pedemontanos del oeste. La recarga obedecería a tres mecanismos principales: i) infiltración de la precipitación en abanicos aluviales, ii) infiltración en zonas de planicies de inundación, en los ríos que se originan en los mencionados abanicos aluviales, y iii) infiltración de precipitación local previamente estacionada en superficie.

Se propone un estudio más detallado con un mayor número de pozos y se recomienda determinar la concentración de tritio por lo menos en un número de pozos como los aquí analizados o, de ser posible, en mayor cantidad para, en función de los resultados, planear un muestreo para carbono-14 en el área de estudio. Estos nucleídos podrían definir con un grado mayor de certeza si la recarga está asociada a los ríos, como el acuífero cuaternario del río Dulce, o a la recarga autóctona directa en los abanicos fluviales y piedemontes.

3.3.4 Trabajos propuestos

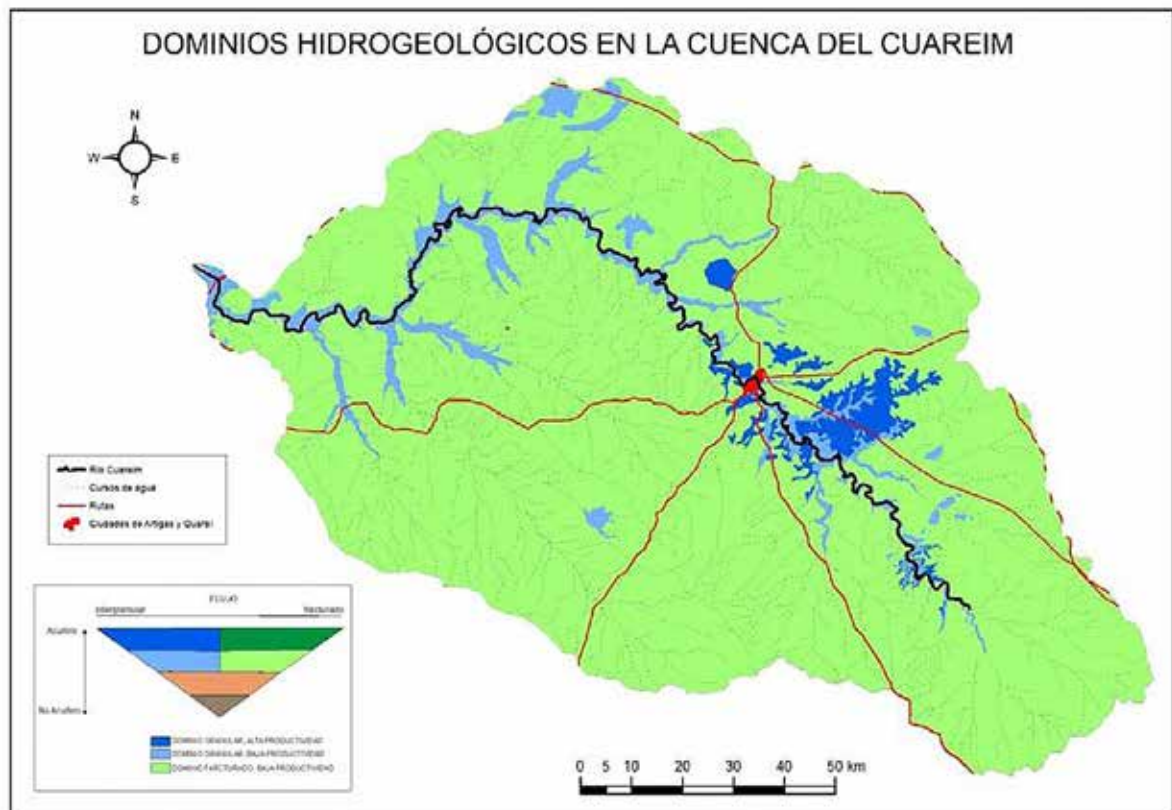
Se propone continuar con la realización de trabajos de integración de los conocimientos geológicos e hidrogeológicos del

subsuelo, mediante la ejecución de una serie de relevamientos que permitan la obtención de información actualizada de la estructura geológica profunda donde se implantan los acuíferos profundos del SAYTT:

- Relevamientos gravimétricos que conduzcan a la generación de mapas integrados Isogálicos, de Anomalías de Bouguer, etc., que permitan interpretar mejor las estructuras profundas.
- Relevamientos magnetométricos que conduzcan a la interpretación de la compartimentalización del basamento de la cuenca Chaco Paranense en el sector del SAYTT.
- Relevamientos magnetotelúricos de Audio Magneto Teluria y Magneto Teluria que, a través de distintas longitudes de onda, permitan la interpretación 1D, 2D y 3D de la estructura profunda en las Zonas Transfronterizas del SAYTT.
- Relevamientos de perfiles geoelectricos, SEV en pozos, etc., que permitan definir diferentes interfaces entre agua dulce y salada en el SAYTT, especialmente en los acuíferos profundos.
- Realización de los estudios isotópicos de H3 (tritio) y finalización de los estudios de C14, O18 y D2 (deuterio) con el objetivo de conceptualizar el modelo

Figura 3.4.1.1

Dominios Hidrogeológicos en la cuenca del Cuareim



Fuente: Memoria del mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, Programa Marco 2015

Figura 3.4.1.2

Ejemplo de simbología usada en el mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí

COLOR MAPA	CÓD. MAPA	INTERPRETACIÓN
	(5) K1ar	• Acuífero fracturado • Unidad Hidroestratigráfica Arapey • Edad Cretácico inferior • Productividad muy baja
	(2) K1r	• Acuífero granular, confinado • Unidad Hidroestratigráfica Rivera • Edad Cretácico inferior • Productividad alta

hidrogeológico del SAYTT, fundamentalmente en el ámbito transfronterizo entre Argentina, Bolivia y Paraguay.

Asimismo, una vez seleccionados sectores representativos del SAYTT en base a características geológicas, hidrodinámicas y de operatividad, se propone efectuar el muestreo hidroquímico actualizado y el monitoreo hidroquímico de elementos mayoritarios, minoritarios y elementos traza representativos de importancia sanitaria: nitratos, nitritos, arsénico y fluoruros (NO_3^- ; NO_2^- ; As y F $^-$).

Del mismo modo, se propone continuar con el relevamiento de pozos profundos (niveles terciarios), de manera de obtener datos que permitan una mejor caracterización del flujo subterráneo y la ejecución de un mapa de potencial hidráulico de integración del SAYTT y fundamentalmente, en los sectores transfronterizos entre Argentina, Bolivia y Paraguay.

Además, en base a los conocimientos obtenidos, se propone la generación de transectas hidrogeológicas transfronterizas entre los países Argentina, Bolivia y Paraguay, de modo de poder efectuar la integración de los acuíferos de niveles profundos del SAYTT.

Finalmente, de acuerdo a las propuestas presentadas en la Reunión del Grupo de Trabajo de Aguas Subterráneas en Asunción, Paraguay, del 6 y 7 de agosto del 2015, se propone la ejecución de algunos pilotos del SAYTT (principalmente en la zona de Alto-Medio río Bermejo y Alto – Medio río Pilcomayo), para ser incorporados como parte de la red básica de monitoreo de los pozos del Sistema Cuenca del Plata.

3.4 Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Cuareim/Quaraí

3.4.1 Procedimientos, metodologías y conceptos

El mapa hidrogeológico y la correspondiente memoria fueron elaboradas por el grupo técnico binacional (Brasil – Uruguay) en el marco del Proyecto Piloto Demostrativo de la cuenca del río Cuareim/Quaraí.

Para la realización de la misma, se adoptaron los mismos criterios metodológicos que para el Mapa Hidrogeológico Síntesis de la Cuenca del Plata presentado en el capítulo 3.2.

A partir del relevamiento, análisis, procesamiento e integración de la información geológica, hidrogeológica y de perforaciones de

Tabla 3.4.2.1

Resumen de unidades hidroestratigráficas de la cuenca del Cuareim/Quaraí

DOMINIOS HIDROGEO- LÓGICOS	SISTEMA ACUIFERO	UNIDAD HIDROESTRATI- GRÁFICA	TIPO	PRODUCTIVIDAD	SIMBOLO MAPA
Poroso	N/A	Aluviones	Libre	5	Q2dac
	N/A	Aluviones/Coluviones	Libre	5	Q12dca
	Salto/Arapey	Salto	Libre	5	N2s
	Guaraní	Rivera/Botucatú	Libre	2	J3K1r/J3K1b
		Rivera/Botucatú	Confinado	1 ó 2	J3K1r/J3K1b
		Tacuarembó/Guará	Confinado	1	J3t/J3g
Fracturado	Basalto	Arapey/Serra Geral	Libre	5	K1a/K1sg

la cuenca, se confeccionó el mapa hidrogeológico según la metodología usada por CPRM (Servicio Geológico de Brasil) y detallada en varias publicaciones (Oliveira Diniz et al., 2014; Oliveira Diniz, 2012; Brito Monteiro, 2013).

La primera gran división se basa en las características lito-estructurales de las unidades geológicas, que condicionan la forma en que se almacena y transmite el agua subterránea en las mismas. De esta manera, se identificaron y separaron en la cuenca dos tipos de dominios hidrogeológicos o unidades hidro-litológicas:

A. Unidades hidro-litológicas porosas: son sedimentos y rocas sedimentarias que almacenan y transmiten agua a partir de los espacios vacíos entre los granos (poros). Generalmente ocurren en forma continua y abarcan grandes áreas, por lo que pueden ser acuíferos importantes en términos de reserva y productividad.

B. Unidades hidro-litológicas fracturadas: están formadas por rocas que almacenan y transmiten agua a partir de espacios

vacíos generados por fracturación. Las rocas plutónicas, efusivas, metamórficas y sedimentos fuertemente litificados forman acuíferos de este dominio hidrogeológico. Son acuíferos en general poco productivos, discontinuos y anisótropos.

La representación en el mapa de estos dos dominios se realizó a través de colores que, según su intensidad, dan una idea cualitativa del potencial acuífero de cada región (Figura 3.4.1.1).

Dentro de estos dominios hidrogeológicos, se diferencian los acuíferos granulares de los fracturados que pueden ser homogéneos o presentar zonas con productividad diferente. Por ejemplo, el acuífero Rivera/Botucatú puede tener mayor productividad confinado que libre. A su vez, puede presentar una productividad muy baja o inclusive nula cuando aparece litificado y/o en zonas topográficas elevadas.

En función de lo anterior, se definen las unidades hidroestratigráficas como formaciones geológicas o partes de ellas que almacenan y transmiten agua subterránea

Figura 3.4.3.1.1

Mapa de foto-lineamientos de la Formación Arapey/Serra Geral con diagrama de direcciones



Fuente: Memoria del Mapa Hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, Programa Marco 2015

de forma semejante y con la misma productividad en el orden de magnitud.

La reunión de dos o más acuíferos, relacionados o no entre sí, puede originar un sistema acuífero, de dominio espacial limitado en superficie y profundidad que constituye una unidad práctica para la exploración o explotación (Oliveira Diniz et al., 2014).

Para la confección del mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim, al igual que para el mapa síntesis de la Cuenca del Plata, se utilizaron dos criterios de clasificación. Por un lado, se separaron con diferente color los dominios hidrogeológicos y por otro, se

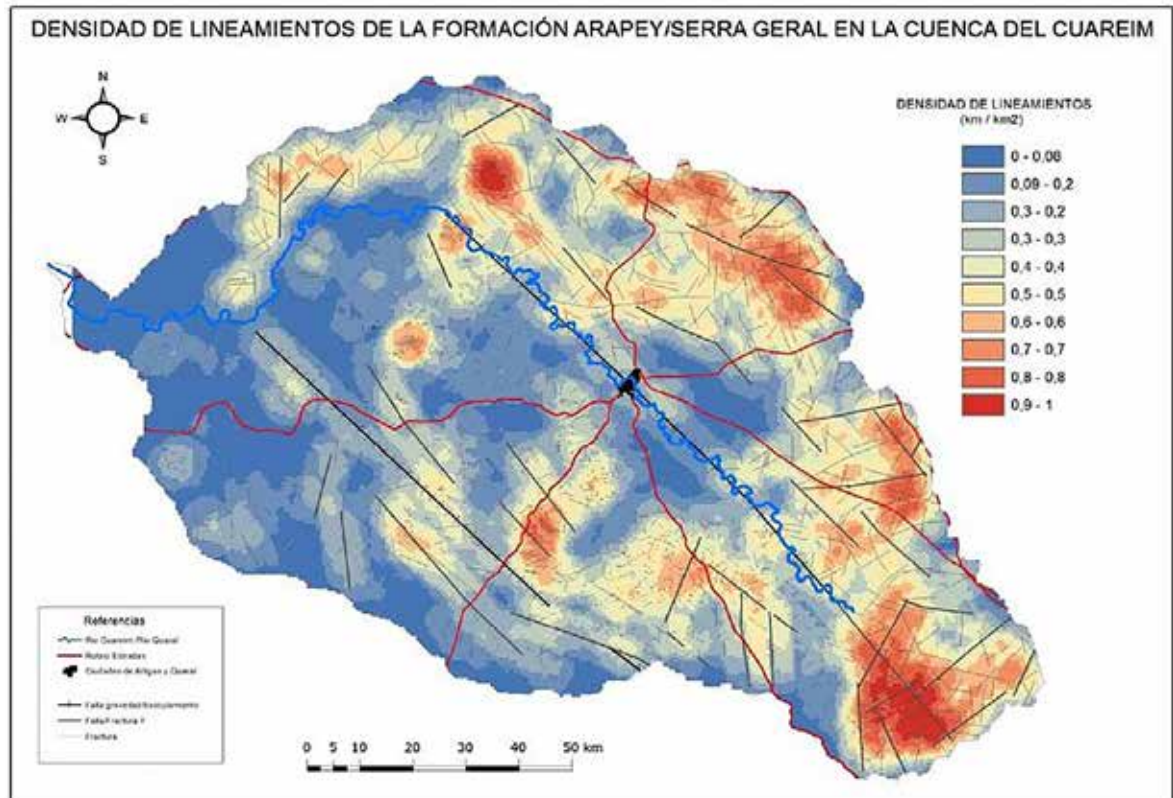
clasificaron las unidades hidroestratigráficas de acuerdo a su productividad, a través de un código alfanumérico, utilizando la información hidráulica de las perforaciones de la cuenca y tomando los valores promedios (Figura 3.4.1.2 y Tabla 2.1.2.1).

3.4.2 Unidades hidroestratigráficas

En base a la información geológica e hidrogeológica de la cuenca, se identificaron y separaron siete unidades hidroestratigráficas que se muestran en forma resumida en el siguiente cuadro y se describen en las siguientes páginas:

Figura 3.4.3.1.2

Mapa de densidad de fracturas de la Formación Arapey/Serra Geral



Fuente: Memoria del Mapa Hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, Programa Marco 2015

3.4.3 Dominio hidrogeológico fracturado

3.4.3.1 Unidade hidroestratigráfica Arapey/Serra Geral (UH-A/SG)

La UH-A/SG, como todos los acuíferos fracturados, es heterogénea y anisótropa, con circulación y almacenamiento de agua subterránea restringida a las zonas fracturadas verticales y subverticales, aunque los parámetros hidráulicos y la productividad pueden variar en forma importante en zonas adyacentes. A diferencia de otros tipos de acuíferos, UH-A/SG puede presentar estructuras horizontales/subhorizontales, especialmente en las zonas de

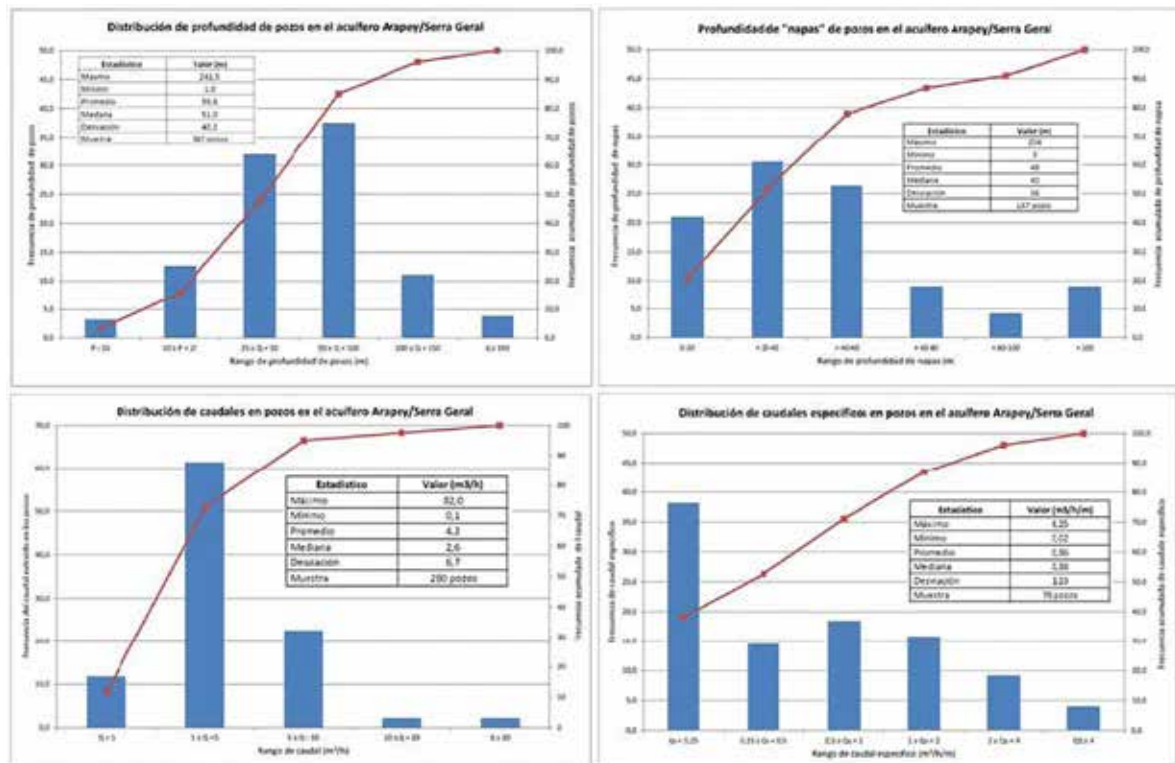
contacto entre derrames y niveles vesiculares/brechoides.

Las discontinuidades en la lava por donde potencialmente puede circular y almacenarse el agua subterránea son:

- Fracturas de enfriamiento que se producen por la contracción de la lava y quedan restringidas al derrame, en especial en la zona central y base (diaclasas).
- Contactos entre derrames y la zona altamente vesicular que pueden sufrir fenómenos de meteorización generando discontinuidades horizontales/subhorizontales.

Figura 3.4.3.1.3

Análisis de los datos de profundidad de pozos, de napa, caudal y caudal específico de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Arapey/Serra Geral



Fuente: Memoria del Mapa Hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, Programa Marco 2015

- Discontinuidades tectónicas, producidas por esfuerzos post-enfriamiento de la lava (sin y post evento efusivo), generando fallas y fracturas que pueden tener gran desarrollo horizontal y vertical, pudiendo intersectar más de una colada.

La forma de emplazamiento de los derrames, la distribución espacial de sus estructuras intra e inter derrames y los múltiples estadios de su formación imprimen a este tipo de acuífero una notable y peculiar heterogeneidad física. La conductividad hidráulica es muy variable y compleja de evaluar y prever. Esta importante variación lateral de la permeabilidad resulta en

las existencias de pozos productivos y pozos secos a corta distancia uno de otro (Freitas, M. A. et al., 2002).

El modelo hidrogeológico estructural de circulación de aguas subterráneas en los basaltos para la región noroeste de la Formación Arapey se caracteriza por fracturas tectónicas, que operan como las principales vías de circulación de agua, pudiendo cortar varios derrames. Esta circulación principal alimenta y conecta a las diaclasas (fracturas sin deslizamiento), de escasa longitud y generalmente restringidas a la zona masiva de la lava y que actúan como vías de circulación menor (Hausman y Fernández, 1967).

Estos autores minimizan la importancia de las estructuras horizontales para la circulación de agua.

Por otra parte, en otras regiones existe una relativamente importante circulación y almacenamiento de agua en las juntas horizontales, localizadas en el tope y base del derrame, así como en los contactos entre derrames (G. Lastoria et al., 2006)], aunque puede tener una productividad baja si están aisladas (Roehe Reginato et al., 2007).

Además de la presencia de discontinuidades, otros aspectos pueden influir en el potencial hidrogeológico de la zona: tipo y densidad de discontinuidades, interconexión entre las mismas y presencia o no de relleno en las fracturas. Algunos autores también han postulado una correlación entre dirección de las fracturas y productividad de las perforaciones (Roehe Reginato y Strieder, 2006).

En síntesis, las características estructurales como tipo, densidad, conectividad, dirección y relleno de las discontinuidades pueden ser diferentes entre áreas próximas entre sí. Por lo tanto, un modelo hidrogeológico más ajustado de la cuenca solo se puede obtener a partir de estudios detallados e información más exacta y controlada, lo que escapa a los alcances del presente trabajo.

Como una primera aproximación a los aspectos estructurales de la Formación Arapey/Serra Geral dentro de la cuenca del Cuareim/Quaraí, se muestra en la **Figura 3.3.1.5** la red de discontinuidades obtenidas a partir de la fotolectura de imágenes satelitales de alta resolución e imágenes de relieve de sombras (hillshade) producida a partir del procesamiento del modelo de elevación de la NASA (SRTM).

Con el fin de obtener un diagrama de direcciones de los lineamientos (roseta) y un mapa de densidad (**Figura 3.4.3.1.1**), se relevaron y sistematizaron las fracturas y fallas extraídas de antecedentes cartográficos.

En las **Figuras 3.4.3.1.1 y 3.4.3.1.2**, se observa que las direcciones predominantes son noreste y noroeste, y en particular se destacan levemente las direcciones N 50-70 E, N 30-50 W y N 70 W.

En lo que respecta a la concentración de fracturas, se observa que las zonas de mayor densidad se localizan al sur y este de la cuenca, coincidiendo en general con la región de menor espesor de lava o, en otros sectores, de modo aproximado, con las principales estructuras interpretadas como fallas.

Esta unidad hidroestratigráfica cubre más del 90 % de la cuenca del Cuareim/Quaraí (con espesores en general superiores o muy superiores a los 100 m y constituye la principal fuente de agua subterránea de bajo costo, debido a la poca profundidad de los pozos), pequeños caudales y relativamente buena calidad de agua. Su uso se restringe al abastecimiento de pequeños poblados con fines domésticos y a la producción ganadera. A partir de la información recopilada tanto en Brasil como en Uruguay, se identificaron 342 perforaciones que extraen agua de esta unidad. En base a esos datos (profundidad de pozo y de napa, caudal y caudal específico), se ejecutó un análisis estadístico básico, cuyos resultados se presentan en forma de gráfica en la **Figura 3.4.3.1.3**.

Más del 80% de las perforaciones presentan profundidades iguales o menores a los 100 m, los intervalos más frecuentes son entre 50 y 100 m y entre 25 y 50 m. La media de profundidades es cercana a 60 m y la mediana, de alrededor de 50 m.

Tabla 3.4.2.1

Resumen de unidades hidroestratigráficas de la cuenca del Cuareim/Quaraí

	Nivel explotado	Transmisividad (m ² /día)	Coefficiente de almacenamiento
Área Bajo Basalto	54 – 120 m	Aluviones	10 ⁴
Área aflorante	60 – 120 m	Aluviones/Coluviones	4,50 × 10 ³
Área aflorante	150 – 210 m	Salto	1,36 × 10 ³

Fuente: Pérez et al. (2000)

La localización de las napas representa la ubicación en profundidad de las estructuras por las que circula el agua subterránea (fallas, diaclasas y estructuras horizontales). En el caso de las perforaciones con datos (167 pozos), las estructuras “portadoras” de agua subterránea se intersectaron a una profundidad máxima de 204 m y a una mínima de 3 m. Estas estructuras se localizaron entre los 48 m (promedio) y 40 m (mediana), mientras que en cerca de un 80% de los pozos, las estructuras portadoras se intersectaron a menos de 60 m.

Los caudales registrados tienen un máximo de 83 m³/h hasta un mínimo de 0,1 m³/h,

siendo el valor promedio de 4,2 m³/h y la mediana de 2,6 m³/h. Si bien existe cierta dispersión en los caudales, el 60% de los pozos presenta caudales entre 1 y 5 m³/h y más del 90% de los caudales son menores a 10 m³/h.

Por último, el caudal específico que representa la relación entre volumen de agua extraído por unidad de descenso, es considerado un buen indicador de la productividad de las perforaciones. De las 76 perforaciones relevadas con datos suficientes para el cálculo de este parámetro, más del 35% presentan valores de caudal específico menor a 0,25 m³/h/m y más del 80%

Tabla 3.4.4.1.2

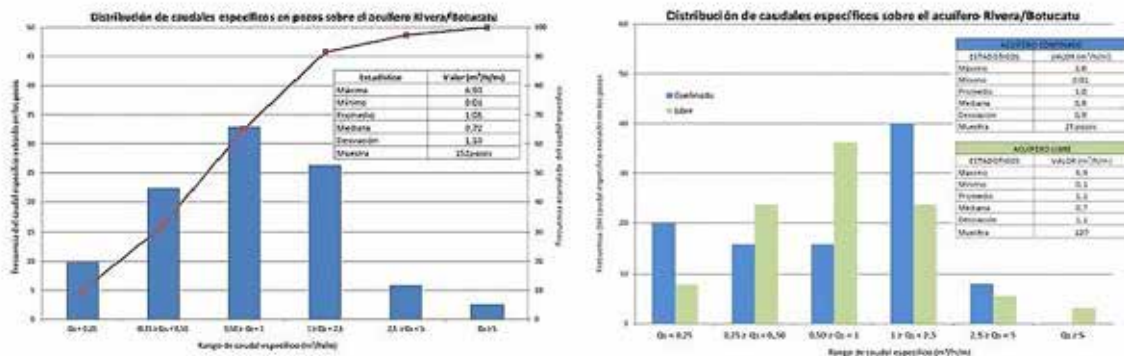
Recopilación de datos hidráulicos de perforaciones en la zona de Artigas/Quaraí

DATOS GENERALES			DATOS HIDRÁULICOS							PERFIL LITOLÓGICO				FUENTE
Nº en Figura 3.8	Ciudad	PP (m)	Q (m³/h)	NE (m)	ND (m)	Q5 (m³/h/m)	T (m/día)	S	K (m/día)	Basalto (m)	Arenisca (m)	Basalto (m)	Arenisca (m)	
1	Artigas	157	50	4,77	45	1,24	17		0,3	0-44	44-49	49-100	100-157	1
2	Artigas	170	60	9,9	63	1,13	19	1,66 × 10 ⁻³	0,6	0-17	17-170			2
3	Artigas	104	18	3,3	41	2,25	44,2	4,7 × 10 ⁻⁴	0,9	0-52	52-104			2
4	Artigas	122	22	30,1	75	0,49	10	3,57 × 10 ⁻⁴		0-73	73-122			3
5	Artigas	116	52	29,5	44,5	3,47	50			0-56	56-116			3
6	Artigas	115	110	11,1	36	4,42	110	4,28 × 10 ⁻³	1,58	0-56	56-115			3
7	Artigas	170	130	11,4	22	12,26	364	4,41 × 10 ⁻⁴	6,2		0-202			3
8	Artigas	370	100	surq	13	11,00	319		1,26	0-36	36-321	321-380	380-400	1
9	Artigas	43,5	6,5	13,4	27,4	0,46	11,3	5,52 × 10 ⁻⁵	1,9		0 a 12	12 a 38	38 a 43,5	2
10	Artigas	52,8	3	27,44	31,52	0,74	18,9		4,7	0-13	13-52,8			2
11	Quaraí	126	40	76	86	4,00	29,52 (FU)		0,336 (FU)	0-52	52-126			4
12	Quaraí	112	31,7	31,3	90,2	0,64	21,29 (FU)		0,278 (FU)	0-60	60-64	64-96	96-112	4
13	Quaraí	102	60,9	2,37	24,48	2,37	95,04 (FU)		0,973 (FU)	0-16	16-30	30-76	76-102	4
14	Quaraí	176	100	1,29	50	2,05	62,88 (FU)		0,360 (FU)	0-98	98-176			4
15	Quaraí	144	108	26,55	100	1,50	37,44 (FU)		0,324 (FU)	0-51	51-70	70-119	119-144	4
16	Quaraí	168	66,56	14,46	30,9	4,05	31,2 (FU)		0,194 (FU)	0-24	24-30	30-108	108-168	4

Fuente: 1 Fondo Universidades (FU); 2 Gagliardi S. 2008; 3 OSE; 4 CPRM/Slagas

Figura 3.4.4.1.2

Análisis de los datos de caudal de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatu



menor a 2,0 m³/h/m. El valor más alto encontrado fue de 6,25 m³/h/m y el menor de 0,02 m³/h/m, siendo el promedio 0,86 m³/h/m y la mediana 0,38 m³/h/m.

3.4.4 Dominio hidrogeológico poroso

3.4.4.1 Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatu (UH-R/B)

Esta unidad se corresponde con la parte superior (aproximadamente 50 m) del Sistema Acuífero Guaraní. Está compuesta por paquetes (sábanas y dunas) de arena fina a media, bien seleccionada, de colores rojizos a naranjas, con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte y estratificación plano paralela. En la zona de Artigas, estas arenas se presentan desde friables o con cierto grado de cementación, hasta muy tenaces, producto de una fuerte silicificación (Gagliardi, 2008). Representa un típico acuífero poroso, donde el agua se almacena entre los espacios de los granos de arena (poros) y circula a través de las conexiones intergranulares, que pueden ser más o menos afectadas por el grado de cementación de la roca.

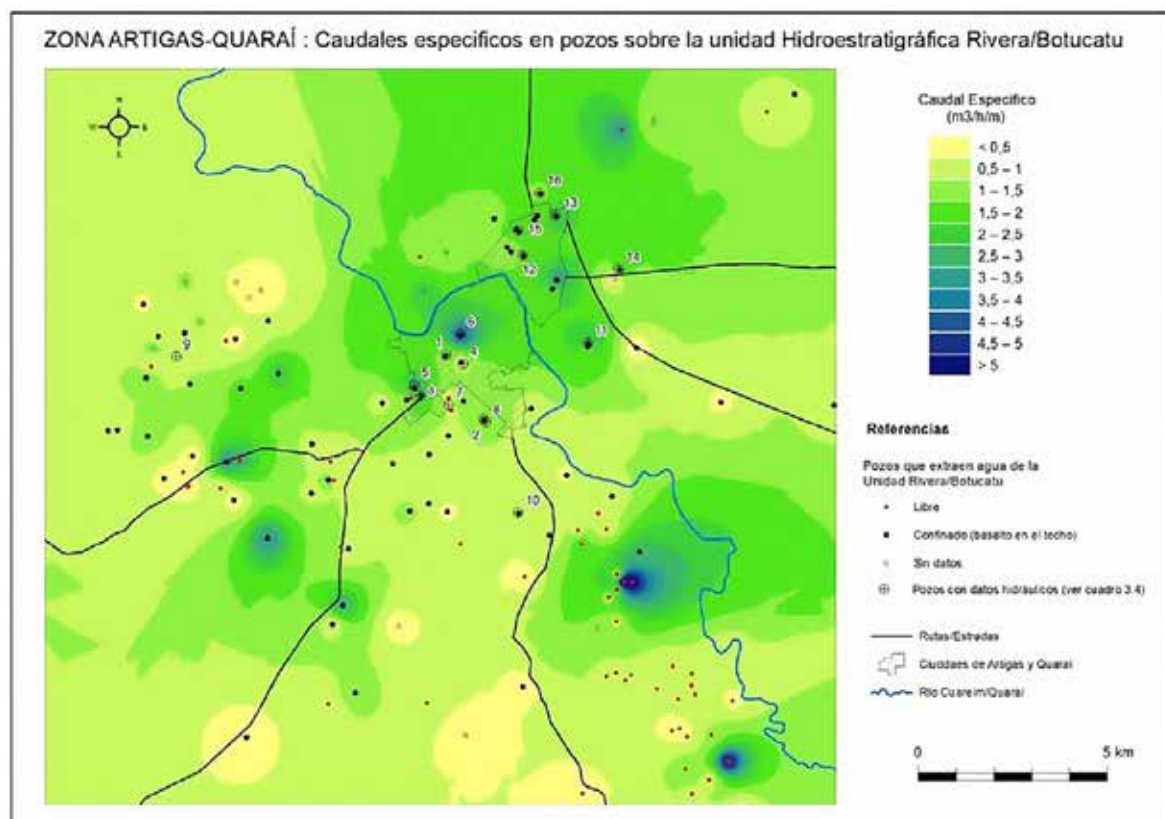
Dentro de la región de la cuenca del Cuareim/Quaraí, la UH-R/B se presenta bajo dos situaciones estructurales/hidrogeológicas distintas.

En la mayor parte de la cuenca, la unidad está cubierta por basaltos cuyos espesores van desde decenas de metros en el sector oriental, hasta cientos de metros en el sector occidental, lo que le confiere características de acuífero confinado. Por otro lado, en pequeñas regiones (ventanas sedimentarias), se presenta aflorante o por debajo de pocos metros de sedimentos aluviales modernos, constituyéndose en un acuífero de tipo libre a semiconfinado.

La principal región aflorante de la UH-R/B, tanto por su extensión como por su intensidad de explotación, se localiza en los alrededores de las ciudades de Artigas y Quaraí. Esta zona presenta una geología relativamente compleja, en donde afloramientos de areniscas se alternan con zonas cubiertas de decenas de metros de lava y en profundidad que pueden aparecer como derrames intercalados con niveles de areniscas (Gagliardi, 2008). Esta situación compleja desde

Figura 3.4.4.1.3

Distribución espacial del caudal específico en base a perforaciones que captan agua en la Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatu



Fuente: Memoria del Mapa Hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, Programa Marco 2015

el punto de vista estructural, estratigráfico e hidrogeológico, genera dificultades a la hora de interpretar los datos hidráulicos de la UH-R/B. Según Gagliardi (2008), esto puede producir barreras hidráulicas y condicionar la continuidad hidráulica lateral y vertical del acuífero.

Por otra parte, en esta zona compleja de la ciudad de Artigas, varias perforaciones relativamente profundas están captando agua también del acuífero subyacente a la UH-R/B. Este acuífero “profundo” es conocido como Tacuarembó en Uruguay y Guará

en Brasil, presentando aspectos litológicos diferentes a la UH-R/B.

Pérez et al. (2000) estimaron los parámetros hidráulicos del SAG en la ciudad de Artigas (Acuíferos Rivera y Tacuarembó). Según los autores de esa publicación, el acuífero presenta diferentes transmisividades en los diferentes niveles de aporte estudiados, verificándose que los valores más altos se encuentran en el nivel más profundo entre los 150 a 210 m (Tabla 3.4.4.1.1).

Para la parte superficial del SAG, asimilable en principio a la UH-R/B, los valores de

transmisividad parecen sensiblemente más bajos, en el orden de algunos pocos $\text{m}^2/\text{día}$ hasta decenas de $\text{m}^2/\text{día}$, como se observa en las perforaciones más someras presentadas en la **Tabla 3.4.4.1.2**.

Se realizó una recopilación de más de 200 perforaciones que extraen agua del SAG, localizadas la enorme mayoría en las ciudades de Artigas y Quaraí y alrededores, ya sea sobre arenisca o con espesores de basalto menores a los 100 m.

Para analizar aquellos pozos que solo extraen agua de la UH-R/B, se seleccionaron únicamente los ubicados sobre arenisca con profundidades menores a los 100 m.

El resultado del procesamiento para los parámetros hidráulicos como caudal y caudal específico se muestra gráficamente en las **Figuras 20 y 21**, acompañadas de una Tabla con los principales datos estadísticos. En cada Figura, se analizó (gráfico a la izquierda) el conjunto de todos los datos y se realizó el análisis por separado (gráfico a la derecha) de pozos sobre arenisca (acuíferos libres) y de pozos con basalto en el techo (acuíferos confinados).

Para el conjunto de datos, más del 50% de los pozos que captan agua de la UH-R/B presentan un caudal entre 2,5 y 5 m^3/h y más del 80%, uno menor a 10 m^3/h . El máximo caudal registrado es de 100 m^3/h y el mínimo de 0,3 m^3/h , siendo el promedio 7,2 m^3/h de y la mediana de 4,8 m^3/h . Si se tiene en cuenta los datos por separado, es decir discriminando por tipo de acuífero, vemos que para los pozos sobre arenisca se mantiene la misma tendencia, pero los caudales de pozos con basalto en el techo presentan una gran dispersión: la mayor parte de ellos se encuentran comprendidos entre el intervalo de 2,5 y 25 m^3/h , con un promedio de 15,3 m^3/h , una mediana de 6 m^3/h y una desviación 21,3 m^3/h .

En lo que respecta al caudal específico, más del 30% de los pozos presentan valores entre 0,5 y 1,0 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ y más del 90%, tiene valores menores a 2,5 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$. El máximo valor registrado es de 6,9 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ y el menor de 0,01 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$, siendo el promedio de 1,05 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ y la mediana de 0,72 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Cuando se analizan los datos por tipo de acuífero, se observa que los caudales específicos de los pozos sobre arenisca

Figura 3.4.4.2.1

Análisis de los datos de profundidad de pozos y caudal de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Salto/Arapey.

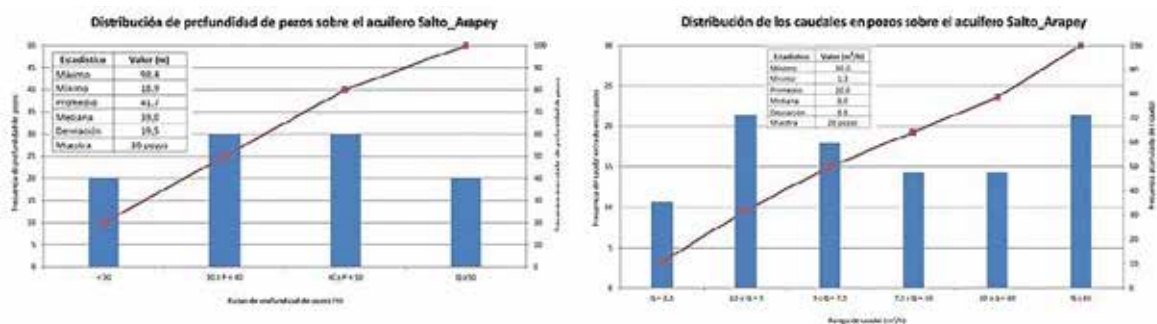
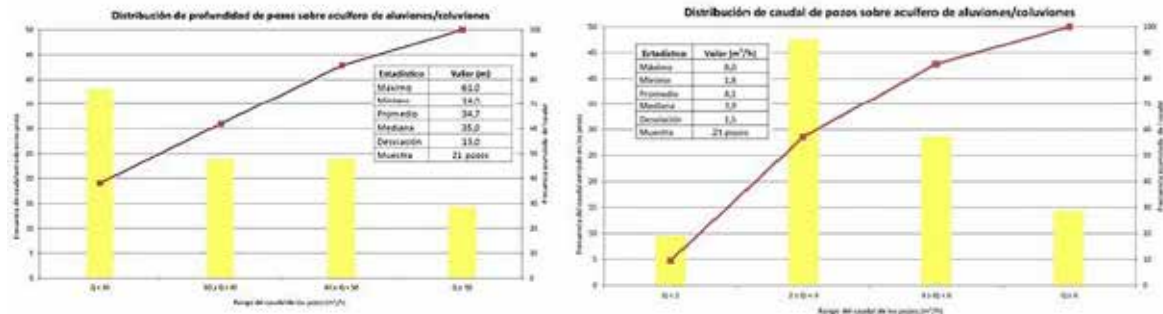


Figura 3.4.4.3.1

Análisis de los datos de profundidad de pozos y caudal de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Aluviones/coluviones.



(acuíferos libres) presentan una tendencia similar a la anteriormente descrita para el conjunto de los datos. En cambio, en los pozos con basalto en el techo (acuíferos confinados), se observa que un 40% tienen un caudal específico algo mayor que el conjunto, con caudales entre 2,5 y 1,0 m³/h/m. Pero también existe un 20% con caudales específicos bajos (menor a 0,25 m³/h/m), por lo cual los estadísticos centrales (promedio y mediana) terminan siendo similares para ambos grupos.

Para la región de Artigas y Quaraí, a partir de los datos puntuales de caudal específico en los pozos relevados, se realizó un mapa de tipo predictivo. En él se muestran las variaciones del caudal específico en la región y sus valores más probables (Figura 3.4.3.1.3), junto con los puntos de las perforaciones utilizadas para realizar la interpolación, discriminados por tipo de acuífero (libre o confinado). Además, en el cuadro 4, se señalan las perforaciones que presentan parámetros hidráulicos.

3.4.4.2 Unidad hidroestratigráfica Salto (Sistema Salto/Arapey)

Esta unidad aparece en forma de pequeños cuerpos en el extremo oeste de la cuenca del Cuareim/Quaraí, en los alrededores de la localidad de Bella Unión, Uruguay. Está integrada por arena hasta conglomerados en cuerpos lenticulares. Potencialmente, presenta buena aptitud litológica para el almacenamiento y circulación de agua en importantes cantidades, pero su extensión es muy restringida por lo que se la clasifica como de productividad baja a muy baja. Al sur, en los alrededores de la ciudad de Salto, Uruguay, esta misma unidad desarrolla cuerpos más extensos y potentes, por lo que la productividad es sensiblemente mayor.

Del lado argentino, esta unidad es conocida como Salto Chico y presenta una enorme extensión y relativamente buena potencia, que junto a una posición topográfica baja generan un acuífero de muy alta productividad. En varios pozos de la localidad de

Salto, aparentemente el acuífero Salto estaría conectado hidráulicamente con la unidad acuífera inferior fisurada Arapey, de la cual captan el agua los pozos, constituyendo el Sistema Acuífero Salto-Arapey (Massa, 1994).

Se relevaron 30 perforaciones que extraen agua subterránea de la zona de Bella Unión donde aflora la formación Salto, encontrándose pocos datos que solo se refieren a profundidades de las perforaciones y caudales extraídos. Además, no se pudo discriminar el acuífero de donde se capta agua por lo que la información y análisis mostrado en la **Figura 3.4.4.2.1** se refiere tanto a pozos sobre el acuífero Salto como al Sistema Acuífero Salto-Arapey.

La profundidad de las perforaciones varía entre 20 m y 98 m. Cerca del 80% de los pozos tiene profundidad igual o menor a 50 m y la profundidad promedio y mediana es de 42 m y 39 m respectivamente.

En lo que respecta a la cantidad de agua extraída, los datos son muy variables con caudales buenos de 30 m³/h hasta pozos pobres con extracciones de 1 m³/h, siendo el promedio 10 m³/h y la mediana 8 m³/h.

Sólo se cuenta con datos hidráulicos en su área tipo, en la ciudad de Salto y sus alrededores, a unos 150 km al sur de Bella Unión. Esta información, con ciertas precauciones, se puede utilizar para caracterizar hidrogeológicamente los afloramientos de esta unidad dentro de la cuenca. La transmisividad promedio de esta unidad hidroestratigráfica se estima en 50 m²/día.

Si se considera para el acuífero un espesor promedio de 20 m, el valor de la permeabilidad es de 2,5 m/día. El caudal específico promedio es de 2,5 m³/h/m, con un máximo

de 5,2 m³/h/m y un mínimo de 0,3 m³/h/m (Montaño, 2004).

3.4.4.3 Unidad hidroestratigráfica aluviones/coluviones

Esta unidad aflora también en el extremo oeste de la cuenca del Cuareim/Quaraí, pero en los alrededores de la localidad brasileña de Barra do Quaraí. Está integrada por areniscas finas hasta conglomerados, de color marrón a rojizo. Esta unidad, conocida como Aloformación Guterres, podría ser equivalente a la formación Salto, anteriormente descripta.

Se pueden realizar las mismas consideraciones que para la unidad Salto, ya que posee un buen potencial hidrogeológico y es común que alumbre caudales relativamente importantes, pero dada su pequeña extensión, se la clasifica como una unidad hidrogeológica de muy baja productividad, solo de importancia local.

Se relevaron para esta unidad 21 perforaciones con datos de profundidad y caudal, cuyo tratamiento y análisis se muestra en la **Figura 3.4.4.3.1**.

La profundidad mayor de las perforaciones sobre esta unidad es de 61 m y la mínima, de 14 m, siendo el promedio y la mediana bastante similares en torno de los 35 m. El rango de profundidades más frecuente (cerca del 40%) es menor a 30 m y cerca del 90% de los pozos presenta profundidades menores a 50 m.

En lo que respecta a los volúmenes extraídos de agua, el caudal máximo es de 8 m³/h y el mínimo es de 1,8 m³/h. El promedio y la mediana son bastante similares, en torno de los 4,0 m³/h. El rango de caudales más frecuente (cerca del 50%) es de entre 2

y 4 m³/h m, presentando cerca del 90% de los pozos caudales menores a 6 m³/h.

3.4.4.4 Unidad hidroestratigráfica Aluviones

La Unidad hidroestratigráfica Aluviones se refiere a los depósitos de los principales cursos de agua, especialmente el río Cuareim/Quaraí, que se están acumulando actualmente o se depositaron en un pasado reciente. Entre ellos, pueden tener cierto potencial hidrogeológico aquellos cuerpos mayores integrados por sedimentos gruesos, desde arena a conglomerados, formados por la dinámica fluvial. En general, se trata de depósitos pequeños, lenticulares y poco potentes que, salvo raras excepciones de captaciones puntuales de agua subterránea, no tienen importancia como acuífero.

3.4.5 Información complementaria del mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí

Dentro del mapa principal, además de separar las unidades hidroestratigráficas por dominio y productividad, se presenta en forma gráfica información sobre pozos relevados en la cuenca. Además de proporcionarse la ubicación geográfica de cada captación de agua subterránea, se indica el acuífero de donde se extrae agua y los rangos de caudales dentro de los cuales está comprendido cada pozo (Figura 3.4.5.1). Otra información complementaria son las isolíneas de igual espesor de lava (Formación Arapey/Serra Geral), que indican la profundidad en la que se localiza el techo de la unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatu confinada (o parte superior del Sistema Acuífero Guaraní).

Los valores de isoespesor fueron calculados utilizando las herramientas geoestadísticas

Figura 3.4.5.1

Simbología utilizada en el mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí

Rango de caudal de perforaciones por acuífero

Acuífero	Caudal (m ³)
Aluviones	• < 2
	• 2 a 5
	• > 8
Salto_Arapey	• < 5
	• 5 a 10
	• > 10
Arapey/Serra Geral	• < 10
	• 10 a 30
	• > 30
Rivera/Botucatu	• < 10
	• 10 a 25
	• > 25

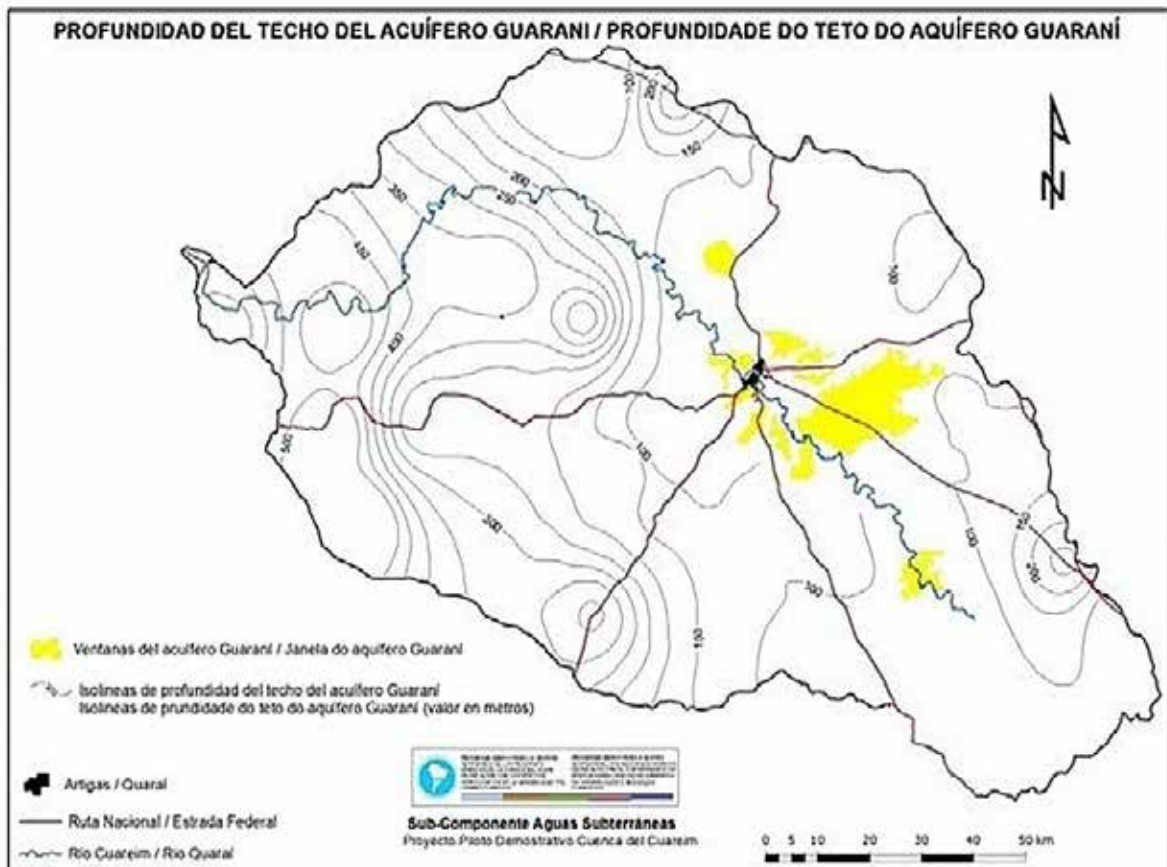
de ArcGis, usando el método empírico bayesiano kriging. La información puntual utilizada es heterogénea tanto en su nivel de precisión (espesor de datos de perforaciones y estimación de espesor a partir de estudios geofísicos) como en su distribución espacial. Si se considera además que la pila volcánica presenta probablemente, en varias regiones dentro de la cuenca, variaciones importantes de espesor en cortas distancias (zona de fallas de gravedad y basculamiento), resulta recomendable tomar los datos de isoespesor calculados con cierta precaución (ver Figura 3.4.4.2.1).

Acompañando al mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, se incluye como información adicional dos mapas, uno de densidad de pozos y otro de volumen anual extraído de agua subterránea.

El volumen anual extraído por perforación se estimó multiplicando el caudal por 8 horas de bombeo por 365 días para los pozos registrados, excepto para los pozos públicos

Figura 3.4.5.2

Profundidad del techo del Acuífero Guaraní en el mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí



Fuente: Memoria del Mapa Hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, Programa Marco 2015

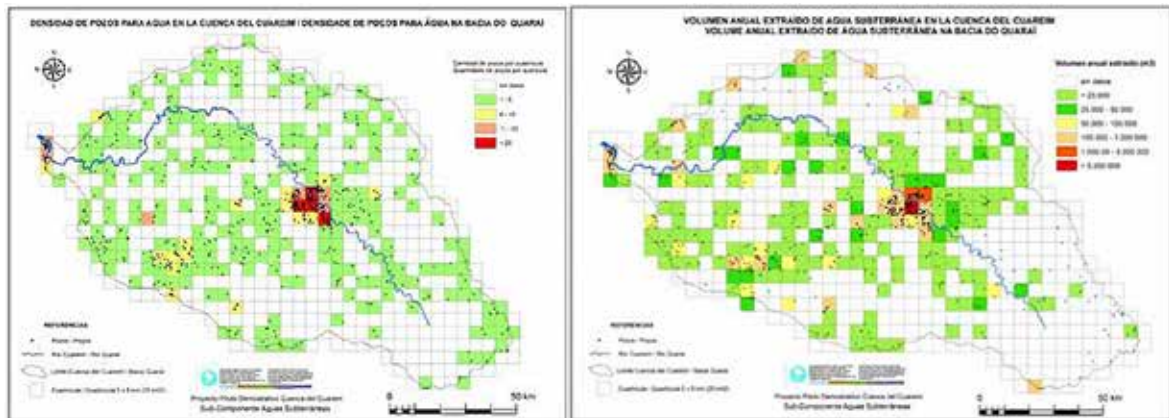
de abastecimiento humano, donde el tiempo de bombeo estimado fue de 20 horas diarias. Como unidad de representación, se utilizó una malla cuadrada de 5 x 5 km, por lo que la densidad o volumen anual de extracción representa la cantidad de pozos o el volumen anual de extracción dentro de la cuenca cada 25 km².

El mapa, presentado en la Figura 3.4.4.3.1, muestra claramente que la mayor concentración de perforaciones para agua se localiza en las ciudades y alrededores de

Artigas y Quaraí, además de en la región al sur de Artigas, seguidas por una segunda zona de menor densidad de pozos en los alrededores de Bella Unión y Barra do Quaraí. La misma situación se observa para el volumen anual de extracción, en donde una gran parte del abastecimiento público de agua proviene de pozos y se concentra en las ciudades de Artigas y Quaraí, donde habitan unas 65.000 personas. En la zona sur de la ciudad de Artigas, hay también un importante consumo de agua subterránea para riego.

Figura 3.4.5.3

Densidad de pozos y volumen anual extraído de agua subterránea en la cuenca del Cuareim/Quaraí



Fuente: Memoria del Mapa Hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí, Programa Marco 2015

Capítulo 4:

Lineamientos de utilización y protección de las aguas subterráneas en la Cuenca del Plata

El Plan Estratégico de Acción referente a aguas subterráneas en la Cuenca del Plata cubre tres lineamientos o directrices esenciales que consideran su gran extensión y el actual nivel de conocimiento sobre los acuíferos, que aún es incompleto.

Estos lineamientos abarcan:

1. El uso sustentable de las aguas, basado en estudios específicos en áreas representativas, con vista a su control y con el fin de prevenir la sobreexplotación de pozos.
2. La protección de los acuíferos, mediante acciones puntuales de protección de pozos y medidas preventivas de control del uso del suelo, así como a través de la zonificación de la vulnerabilidad y del riesgo de contaminación en áreas de recarga.
3. La implementación de instrumentos básicos de gestión que comprenden una red de monitoreo de pozos, un banco de datos e informaciones asociadas a la cartografía de los acuíferos, en conjunto con un

programa de comunicación social dirigido a los usuarios de agua subterránea y al público en general.

La **Tabla 4.1** es una síntesis de los lineamientos a ser desarrollados. Se propone su aplicación simultánea en los cinco países, de común acuerdo, con un ciclo de evaluación anual en relación a sus avances y su efectividad.

Esta propuesta se basa en las actividades desarrolladas por el Grupo Temático de Aguas Subterráneas, en el ámbito del Programa Marco de la Cuenca del Plata, conformado por representantes técnicos de los cinco países. La principal base técnica utilizada para su formulación ha sido el diagnóstico, cuyo producto se plasma en el Mapa Hidrogeológico de Síntesis de la Cuenca del Plata y las cartografías relacionadas, integrados por el Servicio Geológico de Brasil – CPRM. Las acciones sugeridas se implementarán de acuerdo al marco normativo e institucional de cada país integrante de la Cuenca del Plata.

Tabla 4.1

Lineamientos del Plan Estratégico de Acción – Aguas Subterráneas

Lineamientos	Acciones	Recomendaciones
Uso sustentable	Estudios en áreas potencialmente críticas, para proponer medidas de control.	Desarrollar proyectos piloto demostrativos en los estados o provincias.
	Estudios de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en áreas con estrés hídrico, experimentales, con vista a la seguridad hídrica	Desarrollar proyectos piloto demostrativos en los estados o provincias.
	Estudio de seguridad hídrica en el área del proyecto prioritario SAYTT	Evaluar la viabilidad y la conveniencia de la implementación de programas específicos, analizando experiencias desarrolladas en países integrantes de la Cuenca
Protección	Definir criterios técnicos para la implementación de los perímetros de protección de pozos públicos en los municipios.	Propiciar el financiamiento de tareas de difusión y capacitación para la implementación de perímetros de protección, junto con manuales de mantenimiento de pozos.
	Zonificación de la vulnerabilidad y riesgo a la contaminación en áreas de recarga de los acuíferos.	Propiciar la realización de mapas de vulnerabilidad y riesgo en los países de la cuenca del Plata
Instrumentos de gestión	Implementación y operación de la red de monitoreo de pozos.	Propiciar el financiamiento para la implantación de una red de monitoreo mínima en cada país.
	Implementación de un banco de datos de pozos y mapas hidrogeológicos en la plataforma web	Operar de modo descentralizado, con referentes en cada país.
	Implementación del programa de comunicación social, con manuales y folletos dirigidos a los usuarios.	Elaborar y editar folletos temáticos, tales como Aguas Subterráneas, Situación legal de los Pozos, Mantenimiento de pozos, entre otros.

4.1 Uso sustentable del agua subterránea

4.1.1 Realización de estudios en áreas potencialmente críticas

Las áreas potencialmente críticas son aquellas en las que la densidad de pozos y el volumen de agua extraído indican una sobreexplotación o aquellas en las que se desarrollan actividades potencialmente contaminantes con incidencia transfronteriza.

En esas áreas, deberán realizarse estudios hidrogeológicos confirmatorios que abarquen las siguientes actividades: mapeo geológico en escala de detalle; inventario de pozos en campo; ensayos de bombeo e interferencia entre pozos; mapa potenciométrico de los niveles de agua; caracterización de la vulnerabilidad natural y de la carga contaminante sobre el acuífero; muestreo y análisis químicos del agua de los pozos.

La evaluación integrada de los aspectos de calidad y cantidad resultará en la zonificación de áreas de restricción y control del uso de aguas subterráneas.

Una vez delimitada la zona de restricción y control, se recomendará a los organismos gestores de los recursos hídricos la implementación de las siguientes medidas:

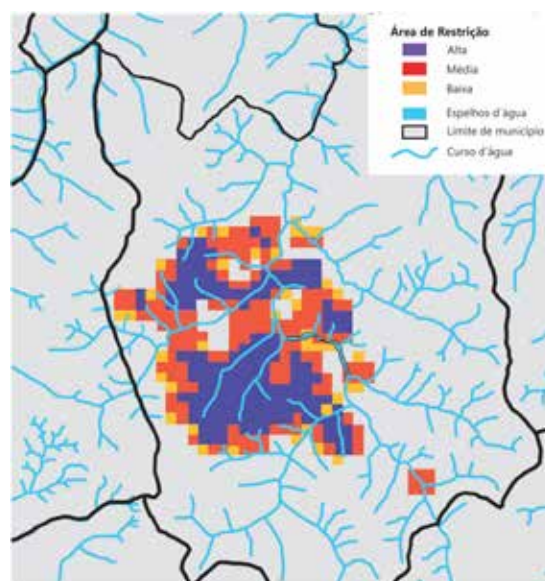
- Recomendar la limitación en la ejecución de nuevas captaciones hasta que el acuífero se recupere o se haya superado el factor que determinó la restricción.
- Asesorar y realizar recomendaciones sobre la conveniencia de la regulación en la captación de agua subterránea, del volumen máximo a ser extraído y del régimen de operación.
- Propiciar el control de las fuentes de contaminación existentes, mediante un programa específico de monitoreo.
- Participar en programas de ordenamiento territorial que consideren la radicación de nuevas actividades potencialmente contaminantes.

En la **Figura 4.1.1.1**, se muestran las categorías de restricción resultantes del estudio efectuado en la ciudad de San José de Rio Preto (400 mil habitantes) en San Pablo, expresadas en cuadrículas de 500 x 500 metros.

En el ámbito de la Cuenca del Plata, se propone desarrollar un proyecto piloto demostrativo en cada país, estado o provincia, en base a las áreas definidas a partir de la cartografía hidrogeológica del Programa Marco de común acuerdo con los organismos gestores locales.

Figura 4.1.1.1

Área de restricción y de control del uso de aguas subterráneas en San José de Rio Preto, San Pablo



Fuente: DAEE/IG/Servmar, 2012

4.1.2 Estudios de viabilidad de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en subcuencas con estrés hídrico.

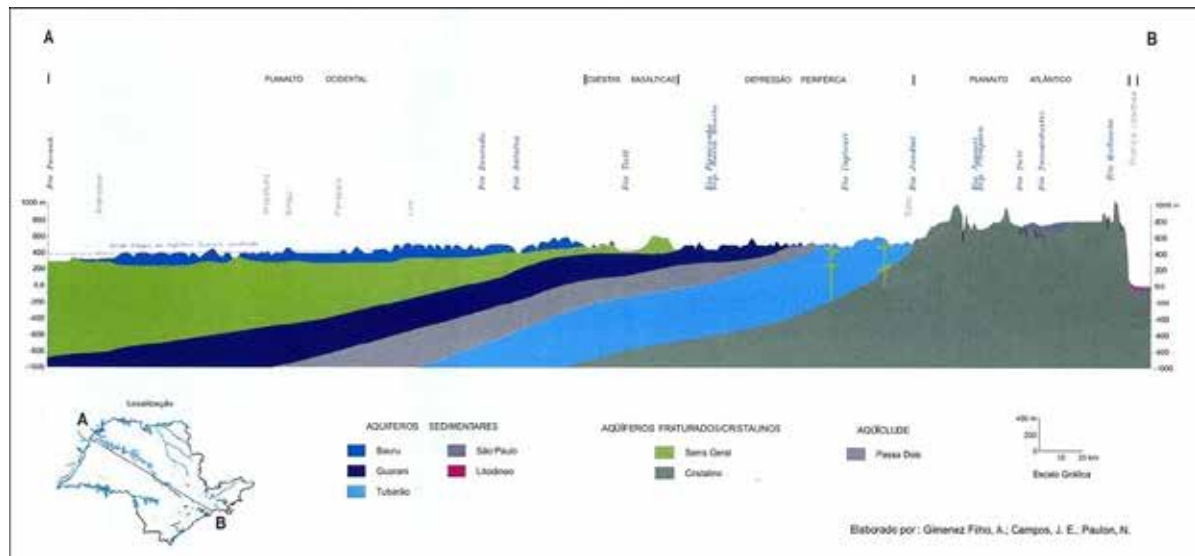
En grandes áreas de la cuenca del Paraná, los acuíferos Guaraní, Serra Geral y Bauru aparecen superpuestos (**Figura 4.1.2.1**). Por sobre ellos, se extienden subcuencas hidrográficas que ya presentan escasez hídrica por sobreexplotación de aguas superficiales.

En este marco, se propone escoger una subcuenca crítica con el fin de desarrollar en ella estudios integrados, que comprendan:

- Agua superficial: caudal medio plurianual; caudal mínimo plurianual; meses críticos del período seco; calidad de agua (tramos críticos en cuanto a la contaminación);

Figura 4.1.2.1

Área de restricción y de control del uso de aguas subterráneas en San José de Rio Preto, San Pablo



Fuente: DAAE, IG, IPT, CPRM, 2005

municipios en situación crítica en cuanto a las fuentes disponibles.

- Agua subterránea: evaluación del modelo de flujo e interconexión entre los acuíferos Guaraní, Serra Geral y Baurú, actualizando los estudios regionales existentes.
- Estudio de opciones de uso conjunto del agua superficial y subterránea: ejercicios de modelación por municipio (agua superficial en el período húmedo y agua subterránea en el período seco); utilización mixta, en proporción variable mes a mes.
- Evaluación técnica y económica de alternativas.
- Directrices municipales de utilización y protección de los recursos hídricos.

4.1.3 Estudio de seguridad hídrica en áreas piloto en el SAYTT

El SAYTT, por su extensión, complejidad y situación ambiental, justifica la implementación de áreas piloto representativas, escogidas de común acuerdo entre los tres países (Argentina, Bolivia y Paraguay).

Entre los criterios de selección, deben considerarse la representatividad geológica; la existencia de pozos de explotación y las necesidades de abastecimiento de agua.

Los estudios hidrogeológicos, de acuerdo a las peculiaridades de la geología y del clima de la región, serán direccionados a los procesos de sedimentación en la Cuenca por medio de análisis sedimentológicos y perfiles geoelectrónicos; la profundización en el estudio de los procesos de salinización de las aguas por medio de análisis físico

químicos y de isótopos de las aguas y la zonificación hidrogeológica de las unidades acuíferas portadoras de agua dulce y de su potencial de explotación.

4.2 Protección

Las aguas subterráneas, a diferencia de los ríos, están naturalmente más protegidas de la contaminación. Esto se debe a que el perfil del suelo en la zona no saturada –desde la superficie hasta el nivel freático– representa la primera barrera natural contra la contaminación del agua subterránea. En la zona no saturada o zona de aireación, los poros se llenan de aire y de una película de agua entre los granos, el movimiento de infiltración del agua es lento y el medio es normalmente aeróbico y alcalino.

En estas condiciones, tienen lugar procesos y reacciones químicas de atenuación de los contaminantes, tales como:

- Intercepción, adsorción y eliminación de micro-organismos patogénicos.
- Atenuación de metales pesados y otras sustancias inorgánicas, por precipitación, absorción o intercambio de cationes.
- Absorción y biodegradación de hidrocarburos y compuestos orgánicos.

Estos procesos de atenuación continúan, en menor grado, en profundidad, hasta alcanzar la zona saturada del acuífero, cuando pasa a actuar la dispersión hidrodinámica que resulta en la destrucción de los contaminantes persistentes y móviles.

A pesar de esta función atenuante de los suelos, la amenaza de contaminación es mayor en los acuíferos sedimentarios libres o freáticos, especialmente en aquellas áreas

en las que el nivel de agua es poco profundo y en las zonas de fractura de rocas.

4.2.1 Fuentes potenciales de contaminación

Las fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea pueden ser clasificadas en puntuales y dispersas. La **Tabla 4.2.1.1** muestra los tipos más comunes de actividades y los respectivos contaminantes más frecuentes.

Las principales fuentes de contaminación difusa son:

- Infraestructura sanitaria in situ, en áreas urbanas carentes de red de aguas residuales, por medio de fosas negras o fosas sépticas mal construidas, lo que provoca una contaminación generalizada del agua subterránea por nitratos, bacterias y virus.
- La actividad agrícola, especialmente en áreas que implementan prácticas perjudiciales, tales como la falta de rotación de cultivos o la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas, lo que implica altas tasas de lixiviación de nitratos y agrotóxicos del suelo para el agua subterránea.

Entre las fuentes puntuales de contaminación, se pueden destacar:

- Lixiviación de vertederos y vertedero sanitario
- Fugas de tanques en gasolineras (estaciones de servicio)
- Descargas de efluentes industriales en el suelo
- Lagunas de estabilización sin revestimiento

Tabla 4.2.1.1

Fuentes de contaminación y contaminantes

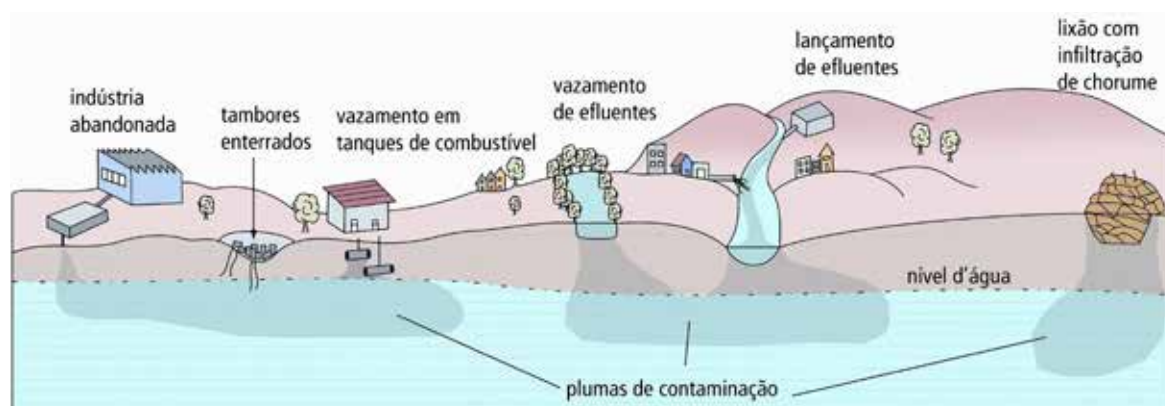
Origen de la contaminación	Tipo de contaminante
Actividad agrícola	Nitrato; amonio; agroquímicos; organismos fecales
Saneamiento in situ	Nitrato; hidrocarburos halogenados; micro-organismos
Garajes y puestos de servicio	Hidrocarburos aromáticos y halogenados; benceno; fenoles
Disposición de residuos sólidos	Amonio; salinidad; hidrocarburos halogenados; metales pesados
Industria metalúrgica	Tricloroetileno; tetracloroetileno; hidrocarburos halogenados; fenoles; metales pesados; cianuretos
Pintura y esmaltado	Alquibenceno; hidrocarburos halogenados; metales; hidrocarburos aromáticos; tetracloroetileno
Industrias de madera	Pentaclorofenol; hidrocarburos aromáticos; hidrocarburos halogenados
Limpieza a seco	Tricloroetileno; tetracloroetileno
Industria de pesticidas	Hidrocarburos halogenados; fenoles; arsénico
Disposición de lodo de aguas residuales	Nitrato de amonio; hidrocarburos halogenados; plomo; zinc
Curtiembres	Cromo; hidrocarburos halogenados; fenoles
Extracción/exploración de gas y petróleo	Salinidad (cloruro de sodio); hidrocarburos aromáticos
Explotación minera de carbón y metalíferos	Acidez; metales pesados; hierro; sulfatos

Accidentes ambientales con derrames de productos químicos

La Figura 4.2.1.1 ilustra los procesos de contaminación de agua subterránea.

Figura 4.2.1.1

Fuentes potenciales de contaminación



Fuente: Iritni y Ezaki, 2008

4.2.2. Estrategias de protección

4.2.2.1 Escala regional

La evaluación del peligro de contaminación de un acuífero en un lugar determinado puede realizarse por medio del análisis integrado de dos factores, tales como la vulnerabilidad natural del acuífero a la contaminación o la caracterización de la carga contaminante en el lugar.

La vulnerabilidad natural es el conjunto de características intrínsecas del acuífero, desde la zona saturada hasta la superficie del suelo, que lo hace más o menos susceptible a la contaminación.

Los autores desarrollaron un método expeditivo de mapeo de la vulnerabilidad natural

en función a la combinación de tres factores (Figura 4.2.2.1.2):

- El grado de confinamiento del agua subterránea, en escala de 0.0 a 1.0;
- La caracterización litológica de la zona no saturada, en escala de 0.4 a 1.0;
- La profundidad del nivel freático, en escala de 0.6 a 1.0.

El índice de vulnerabilidad es el producto de estos tres factores, en escala de 0.0 a 1.0, clasificada como insignificante, baja, media, alta y extrema. En base a esta organización de los índices, pueden ser trazados mapas de zonificación de la vulnerabilidad natural para un área en la cuenca hidrográfica de interés.

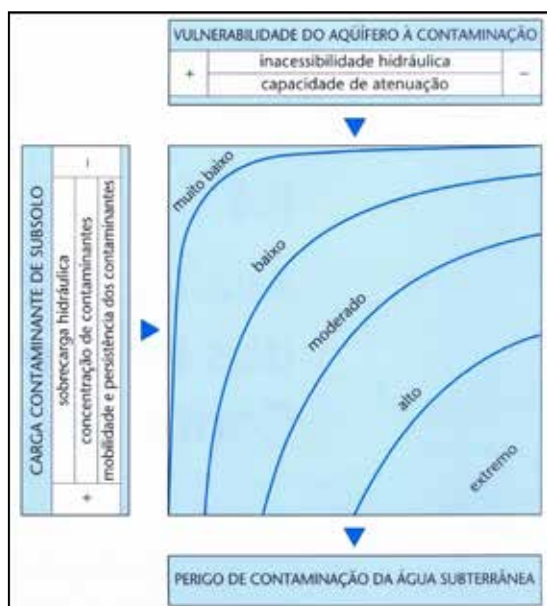
La caracterización de la carga contaminante potencial exige el estudio de cuatro aspectos: el tipo de contaminante (movilidad y persistencia); la intensidad de la contaminación; el modo de disposición del contaminante en el suelo y la duración de la carga contaminante.

Los autores citados adoptan el método POSH para la evaluación de la carga contaminante, en base a dos características: origen del contaminante y sobrecarga hidráulica.

Una vez obtenidas las características de la carga contaminante, las mismas pueden ser representadas, con la simbología adecuada, en el mapa de vulnerabilidad. De esta manera, se obtiene un instrumento cartográfico útil para la prevención y el control de la contaminación de las aguas subterráneas, al posibilitar la zonificación del uso y de la ocupación del suelo tanto en áreas urbanas (con medidas aplicadas en el Plan Director Municipal) como en el ámbito de una cuenca hidrográfica.

Figura 4.2.2.1.1

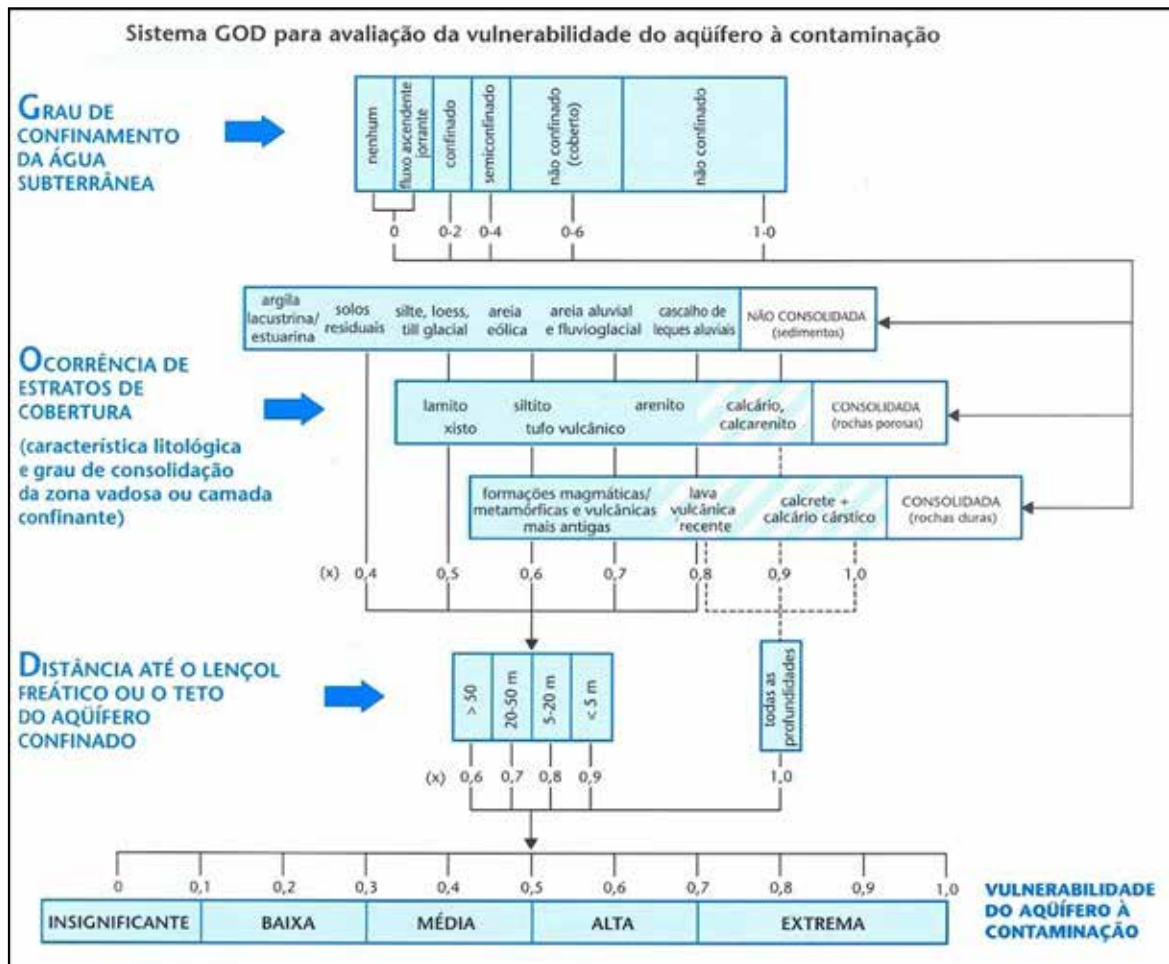
Esquema conceptual para la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea



Fuente: Foster e Hirata, 1988

Figura 4.2.2.1.2

Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación



Fuente: Foster e Hirata, 1988.

La Figura 4.2.2.1.3 es un ejemplo de la zonificación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación del SAG aflorante en el Estado de San Pablo.

Este estudio fue realizado por la Agencia Nacional del Agua (ANA) para toda la porción aflorante brasilera del acuífero. Partiendo de este antecedente, se propone replicar el mismo análisis en la franja aflorante sur, en territorio uruguayo y en la zona aflorante en la región oriental de

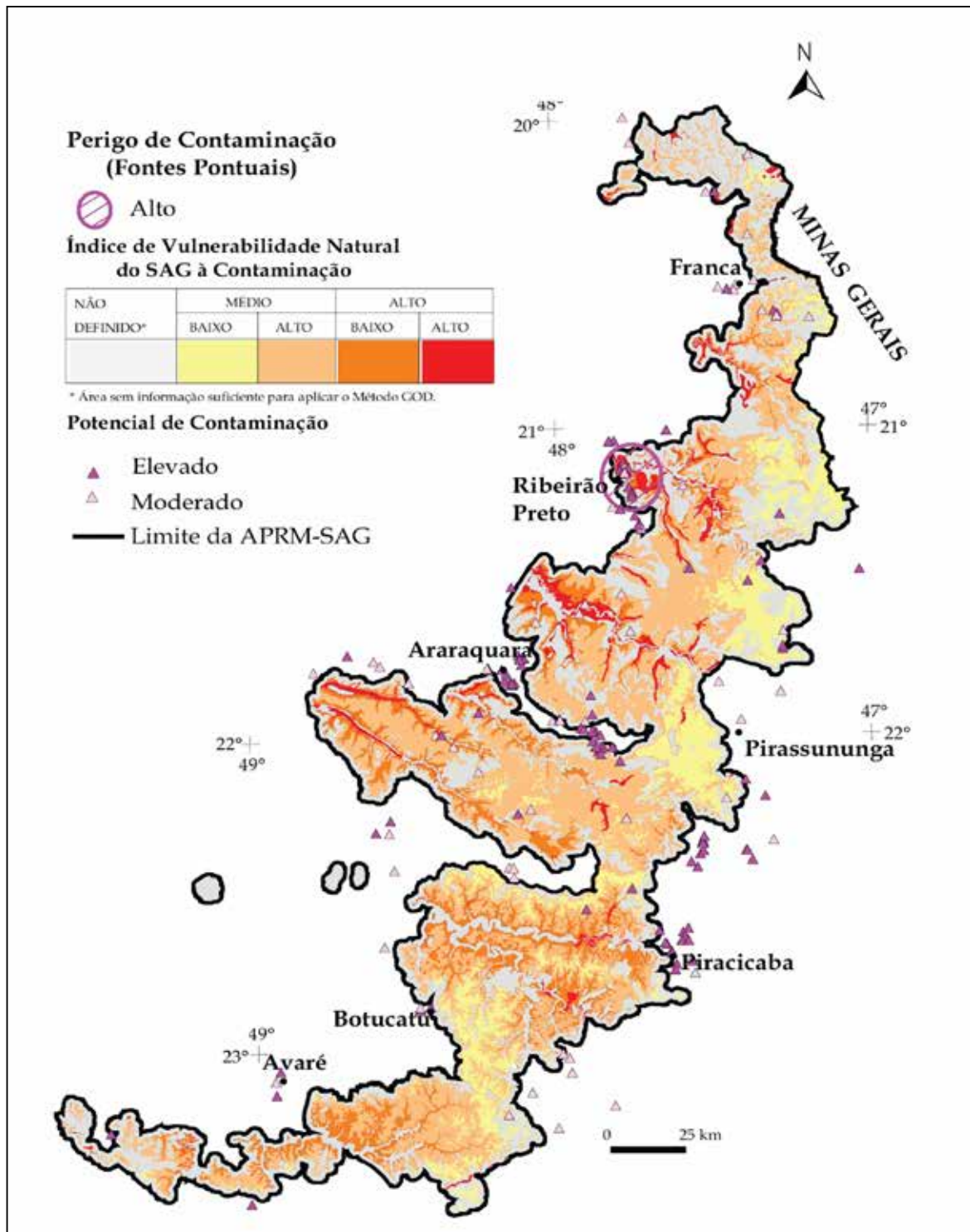
Paraguay. De esta forma, estará concluida la base técnica para la futura creación de un área de protección ambiental del Acuífero Guaraní.

4.2.2.2. Escala local (municipal)

La estrategia local de protección consiste en la delimitación de perímetros de protección de pozos y otras captaciones de agua subterránea, ampliamente adoptados en varios países, al interior de los cuales se establecen

Figura 4.2.2.1.3

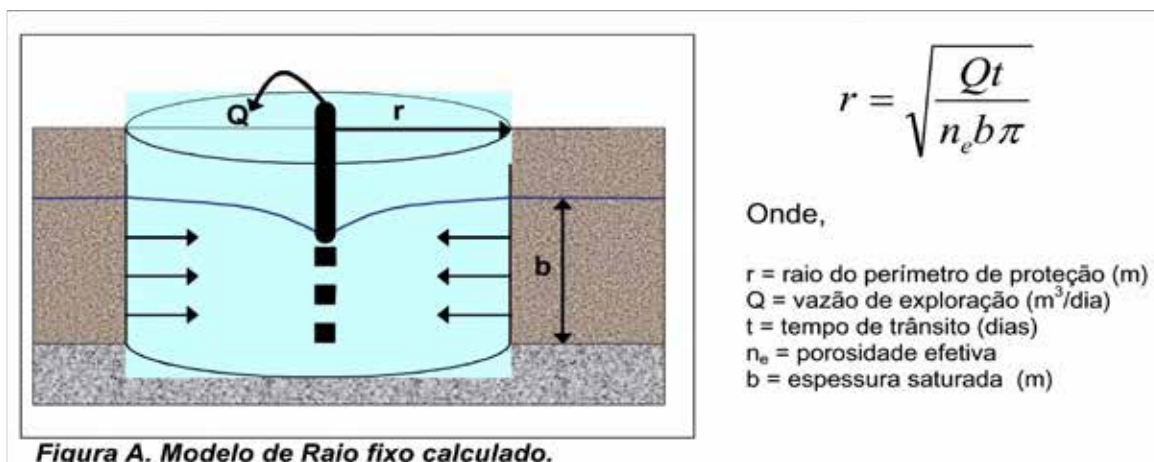
Vulnerabilidad y peligro de contaminación del Acuífero Guaraní aflorante en el Estado de San Pablo



Fuente: IPT, 2011

Figura 4.2.2.1

Zonas de captura y de influencia de un pozo en funcionamiento



Fuente: Iritani y Ezaki, 2010

restricciones a la ocupación por actividades potencialmente contaminantes.

La distancia y el tiempo de tránsito de contaminantes son los criterios más utilizados para la delimitación de los perímetros de protección. Estos perímetros son circunscritos a la zona de contribución (ZC), tal como se muestra en la **Figura 4.2.2.1**. En algunos casos, si esta área es muy extensa, pueden establecerse perímetros internos. La zona de influencia mostrada en la Figura corresponde al radio del cono de depresión del pozo, que puede ser adoptado como perímetro de protección.

A modo de ejemplo, en el Estado de San Pablo, la legislación (Decreto 32.955/91) establece dos zonas de protección:

a. Perímetro inmediato de protección sanitaria

- Radio de 10 m a partir del punto de captación, que deberá ser dotado de perímetro de protección sanitaria para evitar la penetración de contaminantes.

El perímetro debe ser de hormigón armado, fundido in situ, envolver el tubo de revestimiento, tener pendiente desde el centro hacia los bordes, un espesor mínimo de diez cm y un área no inferior a tres m^2 .

b. Perímetro de alerta

- Área de protección interna destinada a la protección contra la contaminación microbiológica.
- Se toma como base una distancia desde el punto de captación, coaxial al sentido del flujo, equivalente al tiempo de tránsito de cincuenta días del agua en el acuífero, en el caso de contaminantes no persistentes.
- En el interior de ese perímetro, deberán regir restricciones a la extracción de agua, control máximo de las fuentes de contaminación que ya están implantadas y una restricción con respecto a nuevas actividades potencialmente contaminantes.

Tabla 4.2.2.2.1

Ejemplos de criterios utilizados internacionalmente para la delimitación de los perímetros de protección de pozos (basado en Navarrete y García, 2003)

País	Perímetros de protección			
Alemania	Zona I Radio de 20 m.	Zona II Tiempo de tránsito de 50 días	Zona IIIA Distancia de 2 km.	Zona IIIB Zona de captura
Francia	Perímetro inmediato 10 a 20 m.	Perímetro próximo 1 a 10 hectáreas ó 50 días de tiempo de tránsito	Perímetro alejado 0,2 a 15 km. o criterio técnico	
Reino Unido	Zona I Protección interior 50 m. ó 50 días de tiempo de tránsito	Zona II Protección exterior 25% da ZC ó 400 días de tiempo de tránsito	Zona III Captación total Zona de captura	Zona Z de protección especial Área fuera de la ZC pero que puede transmitirle contaminación al pozo
Holanda	Área de captación 50 ó 60 días de tiempo de tránsito	Área de protección I 10 años de tiempo de tránsito	Área de protección II 25 años de tiempo de tránsito	Área de recarga 50 a 100 años de tiempo de tránsito
Italia	Zona de protección absoluta	Zona respetada Mínimo de 200 m.	Zona de protección Zona de captura y de la cuenca	

Existen varios métodos para la delimitación del perímetro de protección. Uno de los más simples es el denominado “radio fijo calculado” (Figura 4.2.2.2.2).

Este método considera un pozo cuyo caudal bombeado es Q , en un acuífero con un espesor saturado b , con un tiempo de tránsito t , por lo que cualquier contaminante que entre en este cilindro tardará un máximo de t para llegar al pozo.

El “perímetro de alerta” de la ley paulista, equivalente a la zona II de los otros países (Tabla 3.4.4.1.1), es la zona de protección contra la contaminación bacteriológica.

En defensa de la salud pública, todo pozo que provee agua para consumo humano debe tener un perímetro de protección adecuado. Es por eso que, en el ámbito de la Cuenca del Plata, se propone desarrollar una campaña de implementación de perímetros

de protección en los pozos de abastecimiento público, mediante asistencia técnica especializada, realizada en colaboración con los municipios y financiada por el Programa Marco.

4.3. Implementación y fortalecimiento de las herramientas básicas de gestión

Para asegurar el fortalecimiento y el funcionamiento de los instrumentos básicos de gestión, se propone:

- Desarrollar una red básica de monitoreo de pozos
- Desarrollar una base de datos de pozos asociada a la cartografía de los acuíferos
- Implementar un programa de comunicación social sobre la importancia de las aguas subterráneas y su preservación

4.3.1 Red de monitoreo de pozos

Si bien en Brasil y en los demás países de la Cuenca del Plata operan redes hidrometeorológicas con series históricas de más de 50 años, abocadas a la observación y medición de aguas superficiales, no existe en ellos ninguna red de observación de aguas subterráneas. Por este motivo, se propone implementar una red básica de monitoreo de pozos, concebida como una infraestructura estratégica y enfocada en el monitoreo, permanente, continuo y de largo plazo del agua subterránea.

La propuesta es instalar una red mínima de pozos en los acuíferos sedimentarios mayores —SAYTT, Bauru-Caiuá y Guaraní aflorante— destinada a monitorear el nivel del agua subterránea y su calidad química. Con estos fines, serán construidos pozos de pequeña profundidad, del orden de 30 a 50 m, en los que se realizarán mediciones mensuales del nivel de agua y muestreos y análisis del agua semestrales, de tipo estacional.

En Brasil, esta red mínima ya está instalada y es operada por el CPRM. La recomendación es extenderla a los acuíferos de los demás países y pasar a operarla bajo un mismo protocolo. De este modo, en Uruguay serían construidos de 3 a 5 pozos en el Acuífero Guaraní aflorante y en el SAYTT (AR, BO, PY) se construirían de 6 a 7, en la cuenca piloto representativa.

La efectiva implementación de esta red básica constituye el primer paso para generar una serie histórica de datos, permitiendo analizar la respuesta de los acuíferos a la variabilidad climática y las extracciones.

4.3.2 Implementación de base de datos en plataforma web

Durante el diagnóstico, se recopilaban datos de miles de pozos. Asimismo, se reunieron mapas básicos y cartogramas temáticos que fueron incorporados en una base de datos georreferenciada para los análisis y las consultas, disponibles en el Sistema de Información Geográfica (SIG). Esta información debería estar disponible en forma de “capa” en la plataforma Sistema Soporte de Toma de Decisiones (SSTD) actualmente en desarrollo por el Centro Internacional de Hidrología en el Ente Binacional Itaipú. De esta manera, se facilitaría el acceso a la información de las aguas subterráneas por parte de los usuarios y organismos de gestión de los cinco países.

4.3.3 Programa de comunicación social sobre las aguas subterráneas

Dado que las aguas subterráneas son de algún modo invisibles, es necesario superar la barrera de la falta de conocimiento sobre la ocurrencia, circulación e importancia de este recurso. Es por eso que esta última iniciativa pretende concientizar a los usuarios y a la sociedad en general en el uso racional y la protección de los acuíferos.

El material informativo propuesto conformaría un conjunto de cuatro publicaciones, en formato de manual o guía, cada una de ellas orientada a un público meta. En la fase de divulgación, los materiales serían impresos en portugués y español, en conjunto con versiones en formato digital. Además, se pondría en marcha un portal web que facilite el acceso a la información a un público más amplio.

Las publicaciones a divulgar serían los siguientes:

- Aguas subterráneas: un valioso recurso que requiere protección. CEPIS/OPAS. Dirigida a profesores de la red pública y al público en general.
- Manual sobre mantenimiento de pozos (a elaborar). Dirigido a usuarios particulares y a los servicios municipales de abastecimiento de agua.
- Manual sobre protección de pozos y preservación de la calidad del agua subterránea (a elaborar). Dirigido a usuarios particulares y a servicios municipales de abastecimiento de agua.
- Guía del usuario de aguas subterráneas (a elaborar). Orientación acerca de la concesión de licencias de uso de agua de pozos y normas técnicas.

En el proceso de divulgación, tanto los organismos de gestión como las entidades de la sociedad civil en cada país serán invitados a co-editar los materiales.

4.3.4 Lineamientos para la cuenca del Cuareim/Quaraí

Si bien este texto intenta dar lineamientos generales, vale detenerse en las actividades llevadas a cabo por el grupo temático de Aguas Subterráneas en la cuenca del Cuareim/Quaraí.

Durante el desarrollo del Programa Marco y gracias al importante esfuerzo por parte de las instituciones de Brasil y Uruguay involucradas en el desarrollo de los trabajos, se logró llevar adelante actividades para la elaboración de productos básicos, con el objetivo de unificar y avanzar en el

conocimiento del comportamiento hidrogeológico de la Cuenca, tales como:

- Mapa geológico integrado, incluyendo mapa de espesores de basalto
- Mapa hidrogeológico integrado, incluyendo mapas de densidad de pozos, volúmenes extraídos y piezometría del área Artigas-Quaraí
- Ensayos de bombeo
- Piezometría en el área de Artigas-Quaraí
- Geofísica: sondeos AMT-MT en puntos seleccionados para determinación de espesores de basalto y profundidad de basamento.

Este camino iniciado a nivel piloto demuestra que el trabajo binacional conjunto y coordinado ha permitido generar un avance en el conocimiento hidrogeológico para asegurar el mejor entendimiento de la situación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del Cuareim/Quaraí.

4.3.5 Recomendaciones generales

Teniendo en cuenta las propuestas formuladas, se recomienda la elaboración de un proyecto concreto para el estudio, evaluación y creación de herramientas de gestión en aguas subterráneas, que sirva de soporte a la toma de decisiones, tanto para los gobiernos nacionales como para las instituciones locales.

El siguiente cuadro procura asociar la división territorial con las funciones de la gestión gubernamental sobre los recursos hídricos. A pesar de la extrema simplificación, se pretende graficar que la efectividad de un plan estratégico de acciones depende

en buena medida del involucramiento de los estados o provincias y de los municipios.

Para la ejecución de los proyectos y acciones aquí propuestas, se sugiere que las articulaciones y contratos de financiamiento incluyan explícitamente la participación

del conocimiento local de la región en la que será realizado el proyecto, por ejemplo, mediante el involucramiento de las universidades e institutos de investigación. Ésta es una vía para estimular la apropiación de los resultados y del seguimiento de las acciones por parte de la sociedad local.

Tabla 4.3.5.1

Dimensión geográfica y funciones de la gestión del agua

Regional	Nacional	Estadual/Provincial	Municipal
Plan Estratégico de Acción – PEA	Articulación interestadual/interprovincial para la implementación	• Protección ambiental • Área de restricción • Permiso/Habilitación • Fiscalización	• Uso y ocupación del suelo • Áreas de restricción • Perímetro de protección de pozos



Referencias

- MUNDSTOCK, C. M ET AL.(2011). *Manual de boas práticas agrícolas. Guia para a sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do rio grande do sul*. Instituto Riograndense do Arroz (IRGA).
- BRITO MONTEIRO, A. (2013); *Manual de Preenchimento dos Atributos de Hidrogeologia Geólogo*. Taller sub-componente Aguas Subterráneas, Programa Marco CIC-Plata. CPRM, Recife, Brasil.
- CIC-COMITÊ INTERGOVERNAMENTAL COORDENADOR DOS PAÍSES DA BACIA DO PRATA. Programa para a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos da Bacia do Prata, Considerando os Efeitos Decorrentes da Variabilidade e Mudança no Clima. Disponible en www.cicplata.org. Consultado el 12/09/2014.
- CLEARY, R. W. (1989); “Águas subterrâneas”. En: *Engenharia Hidrológica*. Rio de Janeiro: ABRH; Editora UFRJ (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.2).
- COUYOUPETROU, L. M. (2014); *Informe Socio Productivo Integrado preliminar del Sistema Acuífero Transfronterizo – Yrendá - Toba - Tarijeño – SAYTT*. Programa Marco – CIC / SG-OEA. 53 pág.
- DAEE/UNESP/GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO (2013); *Águas Subterráneas no Estado de São Paulo. Diretrizes de Utilização e Proteção*. São Paulo, 44 p.
- DINIZ, J. A. (2012); *Proposta metodológica para elaboração de mapas hidrogeológicos*. Recife: CPRM (publicación interna).
- FLORES MACHADO, J. L. (2005); *Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema aquífero Guarani no Rio Grande do Sul*. Tesis de doctorado, Universidade do Vale do Rio Dos Sinos. São Leopoldo – Rio Grande do Sul.
- FONDO DE UNIVERSIDADES – SAG. (2005); *Caracterización de las áreas de recarga y descarga del SAG en Rivera-Libramento y Cuaraí-Artigas. Informe Final*; Universidade Federal de Santa Maria (Brasil) y Universidad de la República, Facultad de Ingeniería (Uruguay). Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní
- FOSTER, S.; HIRATA, R. ET AL. (2006); *Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais*. São Paulo: Banco Mundial/Servmar.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. (1979); *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- FREITAS, MARCOS A. et al. (2002); *Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do Estado de Santa Catarina*. Projeto Oeste de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM/SDM-SC/SDA-SC/EPAGRI.

- GAGLIARDI, S. (2008); *Caracterización geológica e hidrogeológica de la ciudad de Artigas y sus alrededores*. Trabajo final de la licenciatura en Geología. Facultad de Ciencias, Universidad de la Republica.
- HAUSMAN A. & FERNÁNDEZ A. (1967); *Hidrogeología de los basaltos del NW*, Universidad de la Republica, Comisión de investigación científica, Facultad de Agronomía, Uruguay.
- IRITANI, M. A. & EZAKI, S. (2008); *As águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA.
- IRITANI, M. A. & EZAKI, S. (2010); *Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço*. São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico.
- LASTORIA GIANCARLO et al. (2006); *Hidrogeologia da formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul*. Revista de Águas Subterráneas, ABAS, v.20, n.1, p.139–150.
- MASSA, E. (1994); *Contribución al estudio del sistema acuífero Salto-Arapey*. Noroeste del Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología (URUGUAY). Informe inédito
- MONTAÑO, J. (2004); *El acuífero Salto: Un recurso hídrico Cenozoico*. Cuencas Sedimentarias de Uruguay – Paleozoico, DIRAC Facultad de Ciencias, Udelar, Uruguay.
- OLIVEIRA DINIZ, J. A. (2012); *Proposta metodológica para elaboração de mapas hidrogeológicos*. Estudo de caso: a folha Rio São Francisco, SC-23, CPRM, Recife, Brasil
- OLIVEIRA DINIZ J. A. et al. (2014); *Manual de Cartografia Hidrogeológica*, Recife: CPRM–Serviço Geológico do Brasil
- PEREZ A. et al (2000); *Comportamiento del Acuífero Guaraní en la Ciudad de Artigas*, Uruguay. 5º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea – ALHSUD. Fortaleza, Brasil.
- ROCHA, G. A. (Coord.) (2005); *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo: DAEE, IG, IPT, CPRM.
- ROCHA, G. A. (2002); *Um copo d'água*. Editora Unisinos.
- ROCHA, G. A. & JORBA, A. F. (2007); *Manual de operação e manutenção de poços*. São Paulo, Departamento de Águas e Energia Elétrica, 3ª. ed.
- ROEHE REGINATO P. A. & STRIEDER A. J. (2006); “*Caracterização estrutural dos aquíferos fraturados da Formação Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul*”. En: Revista Brasileira de Geociências, volume 36.
- ROEHE REGINATO P. A. (2007); *Comportamento hidrodinâmico de poços tubulares associados a aquíferos fraturados condicionados por estruturas primárias das rochas vulcânicas*. XVII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, São Paulo.

- SÃO PAULO. SECRETARIA DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2012); *As águas subterrâneas no Estado de São Paulo: diretrizes de utilização e proteção*. DAEE/LEBAC, 44 p., Il.
- SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. INSTITUTO GEOLÓGICO (2011); *Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos*, n.3. São Paulo: Instituto Geológico, 144 p., Il. Disponible en www.ambiente.sp.gov.br/aquiferos
- SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA (2011); *Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Área de Afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo*. IPT/CPLA.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM (2014); *Mapa de Aguas Subterráneas de la Cuenca del Plata*, escala 1:3.000.000.
- STRUCKMEIER, W. F.; MARGAT, J. (1995); *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend*. Hannover: International Association of Hydrogeologists, 177 p. (International Contributions to Hydrogeology, 17).
- THE OPEN UNIVERSITY (2000); *Os recursos físicos da Terra*. Bloco 4, Parte 1 – Recursos Hídricos. Geoff Brown et al.; tradução y adaptación: Álvaro P. Crosta. Campinas, SP: Editora da Unicamp.
- TUCCI, CARLOS, E.M. (2004); *Visão dos Recursos Hídricos da Bacia do Prata. Visão Regional*. Vol. 1. GEF/CIC/PNUMA/OEA. Buenos Ayres. 219 P.
- UNESCO (1983); *International legend for hydrogeological maps*. Paris: UNESCO, 51.
- UNESCO/DNPM/CPRM (1996); *Mapa Hidrogeológico da América do Sul*. Texto Explicativo. Brasília, 218 p.

Listado de Figuras

Capítulo 2

- Figura 2.1.1 Mapa de localización de la Cuenca del Plata
- Figura 2.1.2 Densidad de informaciones y subcuencas hidrográficas
- Figura 2.1.1.1 Mapa de relieve
- Figura 2.1.1.2 Mapa de isoyetas
- Figura 2.1.3.1 Distribución de salinidades de las aguas subterráneas
- Figura 2.1.3.2 Volúmenes anuales explotados de aguas subterráneas
- Figura 2.1.3.3 Índice de vulnerabilidad natural de los acuíferos
- Figura 2.1.3.4 Vulnerabilidad natural de las aguas subterráneas de la Cuenca del Plata

Capítulo 3

- Figura 3.2.1.1 Mapa hidrogeológico de la Cuenca del Plata
- Figura 3.2.1.2 Determinación de los sistemas acuíferos
- Figura 3.2.1.3 Unidades hidrolíticas de la Cuenca del Plata
- Figura 3.2.2.1 Acuíferos transfronterizos de la Cuenca del Plata
- Figura 3.3.1.1 Mapas de unidades hidrogeológicas del SAYTT
- Figura 3.3.1.2 Perfil hidrogeológico SAYTT y su ubicación en el Valle de Yacuiba
- Figura 3.3.1.3 Perfiles hidrogeológicos Argentina:
- Figura 3.3.1.4 Corte hidrogeológico W-E, de Pozo Hondo y Estancia “La Niña”
- Figura 3.3.1.5 Corte hidrogeológico a lo largo de la ruta Transchaco NW-SE
- Figura 3.4.1.1 Dominios Hidrogeológicos en la cuenca del Cuareim
- Figura 3.4.1.2 Ejemplo de simbología usada en el mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí
- Figura 3.4.3.1.1 Mapa de foto/lineamientos de la Formación Arapey/Serra Geral con diagrama de direcciones
- Figura 3.4.3.1.2 Mapa de densidad de fracturas de la Formación Arapey/Serra Geral
- Figura 3.4.3.1.3 Análisis de los datos de profundidad de pozos, de napa, caudal y caudal específico de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Arapey/Serra Geral
- Figura 3.4.4.1.1 Análisis de los datos de caudal de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatú
- Figura 3.4.4.1.2 Análisis de los datos de caudal específico de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatú
- Figura 3.4.4.1.3 Distribución espacial del caudal específico en base a perforaciones que

captan agua en la Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatú

- Figura 3.4.4.2.1** Análisis de los datos de profundidad de pozos y caudal de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Salto/Arapey.
- Figura 3.4.4.3.1** Análisis de los datos de profundidad de pozos y caudal de perforaciones que extraen agua de la Unidad hidroestratigráfica Aluviones/coluviones.
- Figura 3.4.5.1** Simbología utilizada en el mapa hidrogeológica de la cuenca del Cuareim/Quaraí
- Figura 3.4.5.2** Profundidad del techo del Acuífero Guaraní en el mapa hidrogeológico de la cuenca del Cuareim/Quaraí
- Figura 3.4.5.3** Densidad de pozos y volumen anual extraído de agua subterránea en la cuenca del Cuareim/Quaraí

Capítulo 4

- Figura 4.1.1.1** Área de restricción y de control del uso de aguas subterráneas en San José de Rio Preto, San Pablo
- Figura 4.1.2.1** Acuíferos superpuestos Baurú – Caiuá, Serra Geral y Guaraní en el Estado de San Pablo
- Figura 4.2.1.1** Fuentes potenciales de contaminación
- Figura 4.2.2.1.1** Esquema conceptual para la evaluación del peligro de contaminación del agua subterránea
- Figura 4.2.2.1.2** Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación
- Figura 4.2.2.1.3** Vulnerabilidad y peligro de contaminación del Acuífero Guaraní aflorante en el Estado de San Pablo
- Figura 4.2.2.2.1** Zonas de captura y de influencia de un pozo en funcionamiento
- Figura 4.2.2.2.2** Método de radio fijo calculado

Listado de Tablas

Capítulo 2

- Tabla 2.1.1 Subcuencas hidrográficas y áreas de ocurrencia en los países de la Cuenca del Plata
- Tabla 2.1.2.1 Clases de acuíferos por productividad

Capítulo 3

- Tabla 3.4.2.1 Resumen de unidades hidroestratigráficas de la cuenca del Cuareim/Quaraí
- Tabla 3.4.4.1.1 Datos hidráulicos del SAG, estimados en perforaciones localizadas en la ciudad de Artigas
- Tabla 3.4.4.1.2 Recopilación de datos hidráulicos de perforaciones en la zona de Artigas/Quaraí

Capítulo 4

- Tabla 4.1 Lineamientos del Plan Estratégico de Acción – Aguas Subterráneas
- Tabla 4.2.1.1 Fuentes de contaminación y contaminantes
- Tabla 4.2.2.2.1 Ejemplos de criterios utilizados internacionalmente para la delimitación de los perímetros de protección de pozos
- Tabla 4.3.5.1 Dimensión geográfica y funciones de la gestión del agua

Listado de siglas y acrónimos

ADT	Análisis Diagnóstico Transfronterizo
ANA	Agencia Nacional del Agua (Brasil)
CABAS	Convenio Alemán - Boliviano de Aguas Subterráneas
CdP	Cuenca del Plata
CODETAR	Corporacion Regional de Desarrollo de Tarija
CPRM	Serviço Geológico do Brasil / Servicio Geológico de Brasil
DAAE	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo / Departamento de Aguas y Energía Eléctrica del Estado de São Paulo
MMAYA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia
MDT	Modelo Digital del Terreno
NASA	National Aeronautics and Space Administration / Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio
OEA	Organización de los Estados Americanos
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PAE	Programa de Acciones Estratégicas
PBI	Producto Bruto Interno
PM	Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Plata, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático
SAG	Sistema Acuífero Guaraní
SASG	Sistema Acuífero Serra Geral
SAYTT	Sistema Acuífero Yrendá Toba Tarijeño
SEGEMAR	Servicio Geológico Minero Argentino
SERGEOTECMIN	Servicio Nacional de Geología y Técnico en Minas de Bolivia
SIG	Sistema de Información Geográfica
SSTD	Sistema Soporte de Toma de Decisiones
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Universidad Estatal Paulista “Julio de Mesquita Filho”
UH-A/SG	Unidad hidroestratigráfica Arapey/Serra Geral
UH-R/B	Unidad hidroestratigráfica Rivera/Botucatu
YPFB	Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos

Referencias Institucionales

Representantes de los países en el Consejo Director del Programa Marco

Representante Político	Representante Técnico	Segundo Representante Técnico
Argentina		
Titulares		
Embajador Natalio Marcelo Jamer (2016)	Pablo Bereciartua (2016)	Osvaldo Fernandez (2016)
Embajadora Mónica Rosa Troadello (2011-2015)	Edgardo Bortolozzi (2012-2015)	Roberto Adaro (2015, 2013 y 2012)
	Fabián López (2011)	Julio Nasser (2014)
		Miguel Gomez (2011)
Alternos		
Ministro Eugenio Garcia Santos (2012-2016)	Marcelo Gaviño Novillo (2016)	Miguel Gomez (2014)
	Andrés Rodríguez (2011-2015)	
Bolivia		
Titulares		
Embajador Juan Carlos Alurralde (2013-2016)	Carlos Ortuño (2014-2016)	Oscar Cespedes Montaña (2014-2016)
Embajador Pablo Guzman Lougier (2011-2013)	Luis Marka Saravia (2012-2013)	
Alternos		
Juan Carlos Segurola Tapia (2014-2016)	Oscar Céspedes (2014-2016)	
Mayra Montero Castillo (2011-2016)		
Clarems Endara Vera (2011)		
Brasil		
Titulares		
Embajadora Eugenia Barthelmess (2015-2016)	Julio Thadeu Silva Kettelhut (2011-2016)	
Embajador João Luiz Pereira Pinto (2011-2013)		

Representante Político	Representante Técnico	Segundo Representante Técnico
------------------------	-----------------------	-------------------------------

Brasil		
---------------	--	--

Alternos		
-----------------	--	--

Ministra Consejera Gisela Padovan (2013-2016)		
Primer Secretario Rodrigo de Macedo Pinto (2016)		
Segundo Secretario Joaquim Araújo (2016)		
Secretario Filipe Lopes (2014-2015)		
Secretario Felipe Antunes (2014-2015)		
Ministro Philip Fox-Drummond Gough (2013)		
Segunda Secretaria Patricia Soares (2011)		

Paraguay		
-----------------	--	--

Titulares		
------------------	--	--

Embajador Didier Olmedo (2014-2016)	David Fariña (2014-2016)	
Embajador Luis Fernando Avalos (2012-2014)	Sofía Vera (2013-2014)	
Embajador Gabriel Enciso Lopez (2011)	Daniel González (2013)	
	Silvia Spinzi (2012)	
	Daniel Garcia (2011-2012)	

Alternos		
-----------------	--	--

Primer Secretario Blas Felip (2013-2016)		Rafael Gonzalez (2011)
Ministro Miguel Lopez Arzamendia (2012)		
Consejero Alfredo Nuñez (2011-2012)		
Primera Secretaria Eliana Abigail Vergara (2011-2013)		

Uruguay		
----------------	--	--

Titulares		
------------------	--	--

Martín Vidal (2016)	Daniel Greif (2015-2016)	Alejandro Nario (2015-2016)
Ministro Juan Remedi (2011-2015)	Daniel Gonzalez (2012-2013)	Jorge Rucks (2011-2015)
	José Luis Genta (2011)	

Alternos		
-----------------	--	--

Javier Vidal (2016)	Silvana Alcoz (2015-2016)	
------------------------	------------------------------	--

Unidades Nacionales del Programa Marco

Coordinadores Nacionales

Argentina	Bolivia	Brasil	Paraguay	Uruguay
Titulares				
Miguel A. Giraut (2011-2016)	Mayra Montero Castillo (2011-2016)	Julio Thadeu Silva Kettelhut (2011-2016)	David Fariña (2014-2016) Sofia Vera (2013-2014) Daniel Gonzalez (2013) Silvia Spinzi (2012) Daniel Garcia (2011-2012)	Silvana Alcoz (2011-2016)

Asistentes de Coordinadores Nacionales

Argentina	Bolivia	Brasil	Paraguay	Uruguay
Susana Minatti (2011-2016)		Aureliano Cesar (2011-2016)	Julieta Gauto (2011-2016)	Ana Laura Martino (2011-2016)

Unidades Nacionales del Programa Marco

Grupos Temáticos del Programa Marco

Argentina*	Bolivia	Brasil	Paraguay	Uruguay
Marco Legal e Institucional				
Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto (Mónica Troadelo, Natalio Marcelo Jamer)	Ministerio de Relaciones Exteriores (Juan Carlos Alurralde, Pablo Guzmán Lougier, Mayra Montero Castillo)	Ministerio de Relaciones Exteriores (Eugenia Barthelmess, Joa Luíz Pereira Pinto); Ministerio do Medio Ambiente/ Secretaría de Recursos Hídricos y Ambiente Urbano (Julio Thadeu Silva Kettelhut)	Ministerio de Relaciones Exteriores (Didier Olmedo, Luis Fernando Avalos, Blas Felip)	Ministerio de Relaciones Exteriores (Juan Antonio Remedi)
Sistema Soporte para la Toma de Decisiones				
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Federico Scuka, Carla Lupano)	Ministerio de Medio Ambiente y Agua (Lizet Sullcata)	Agencia Nacional de Aguas (Sergio Barbosa)	Secretaría del Ambiente (Julián Cáceres); Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (Federico Ferreira, Nestor Cabral)	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (Virginia Fernández); Instituto Uruguayo Meteorología (INUMET) (Víctor Marabotto); Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG) (Ignacio Corrales)
Participación Pública, Comunicación y Educación				
Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Silvia Freiler, Daniela García)	Ministerio de Relaciones Exteriores (María del Sagrario Urgel Aguilar, Consuelo Ponce) Ministerio de Educación	Ministerio de Medio Ambiente/ Secretaría de Recursos Hídricos y Ambiente Urbano (Franklin de Paula Júnior)	Universidad Nacional de Pilar (Ernilda Vera); Secretaría de la Información y Comunicación (César Palacios); Secretaría del Ambiente (Maria Coronel)	MVOTMA (Luján Jara); Ana Laura Martino; Ministerio de Educación y Cultura (Laura Barcia); Secretaría Comunicación Presidencia (Carolina Echavarría)
Balance Hídrico Integrado				
Instituto Nacional del Agua/Centro Regional Litoral (Carlos Paoli)	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Luis Noriega)	Instituto de Investigaciones Hidráulicas (André Silveira, Walter Collischonn)	Secretaría del Ambiente (Andrés Wehrle); Universidad Nacional de Asunción (Juan Pablo Nogués); Itaipú Binacional (Pedro Domaniczky)	Universidad de la República (UDELAR) (Luis Silveira, Christian Chreties, Magdalena Crisci, Jimena Alonso); UDELAR-Regional Norte (Pablo Gamazo); CTM-SG (Nicolás Failache); MVOTMA (Rodolfo Chao)

*Consejo Hídrico Federal Argentina (2011– 2016).

Dirección de Hidráulica de Entre Ríos (Oscar Duarte). Instituto Correntino del Agua y del Ambiente (Mario Rujana).

Grupos Temáticos del Programa Marco

Argentina	Bolivia	Brasil	Paraguay	Uruguay
Cantidad y Calidad de Agua				
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Marina Jakomin)	Ministerio de Medio Ambiente y Agua (Geovana Rocabado)	Agencia Nacional de Aguas (Maurrem Ramon Vieira)	Universidad Nacional de Asunción (Inocencia Peralta); Secretaria del Ambiente (Sofía Vera, Aida Olavarrieta)	MVOTMA (Luis Reolón)
Aguas Subterráneas				
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Jorge Santa Cruz, Lida Borello)	Servicio Geológico Minero (Jorge Bellot)	Departamento de Aguas y Energía Eléctrica (Gerôncio Rocha); Servicio Geológico de Brasil (João Alberto Diniz, Fernando Feitosa, Roberto Kircheim)	Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (Andrés Wehrle); Secretaria del Ambiente (Daniel García Segredo)	MVOTMA (Lourdes Batista, Ximena Lacués); CEREAS (Alberto Manganelli) Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) (Enrique Massa, Javier Techera); Obras Sanitarias del Estado (OSE) (Pablo Decoud, Andrés Pérez)
Ecosistemas Acuáticos y Asociados				
Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Sara Sverlij); Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Laura Pertusi)	Dirección General de Biodiversidad y Áreas Protegidas (Sharbel Gutierrez)	Universidad Estadual Paulista (Marcos Nogueira, Danilo Naliato)	Secretaría del Ambiente (Mirta Medina, Nora Neris, Reinilda Duré)	MVOTMA (Guillermo Scarlato); Ana Laura Martino; Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (Alfredo Pereira); UDELAR (Alejandro Brazeiro)
Degradación de la Tierra				
Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (José Cuevas; Pablo Viegas Aurelio)	Ministerio de Desarrollo Rural y Tierra	Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Celso Vainer Manzatto)	Secretaría del Ambiente (David Fariña, José Silvero)	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca MGAP (Carlos Clerici); Facultad de Agronomía de la Universidad de la República - UDELAR (Mario Pérez Bidegain, Fernando García Prechac)
Oportunidades para el Desarrollo				
Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Martín Reymúndez)	Ministerio de Relaciones Exteriores	Ministerio de Transportes (Luiz Eduardo García)	Secretaría Nacional de Turismo (Antonio Van Humbeeck)	Ministerio de Turismo (Marcelo Canteiro)

Unidades Nacionales del Programa Marco

Grupos Temáticos del Programa Marco (continuación)

Argentina	Bolivia	Brasil	Paraguay	Uruguay
PPD Biodiversidad				
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Laura Pertusi); Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Sara Sverlij)	Ministerio de Medio Ambiente y Agua	Universidad Estadual Paulista (Marcos Nogueira); Itaipú Binacional (Carla Canzi)	Secretaría del Ambiente (Darío Mandelburger)	
PPD Confluencia				
Administración Provincial del Agua del Chaco (Patricia Parini)		Itaipú Binacional (Jair Kotz, Carla Canzi)	Entidad Binacional Yacyretá (Lucas Chamorro)	
PPD Cuareim				
		Comité de las Aguas Estadales de la cuenca del río Quaraí (Ivo Lima Wagner); Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul; Departamento de Recursos Hídricos (Fernando Meirelles)		Referente Local (Laura Marcelino); Comisión Cuenca Río Cuareim; MVOTMA (Silvana Alcoz); Ana Laura Martino
PPD Pilcomayo				
Unidad Provincial Coordinadora del Agua de Formosa (Horacio Zambón); Secretaría de Recursos Hídricos de Salta (Alfredo Fuertes)	Ministerio de Relaciones Exteriores (Juan Carlos Seguro, Mayra Montero Castillo); Ministerio de Medio Ambiente y Agua (Oscar Céspedes)		Secretaría del Ambiente (Rosa Morel, Daniel García)	
Escenarios Hidroclimáticos				
Instituto Nacional del Agua (Dora Goniadzki)	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Gualberto Carrasco)	Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Gilvan Sampaio de Oliveira)	Dirección de Meteorología e Hidrología (Julián Baez); Facultad Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción (Benjamín Grassi)	UDELAR (Rafael Terra, Gabriel Cazes, Marcelo Barrero); INUMET (Mario Bidegain)

Grupos Temáticos del Programa Marco

Argentina	Bolivia	Brasil	Paraguay	Uruguay
Monitoreo y Alerta				
Instituto Nacional del Agua (Juan Borús)	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (Luis Miguel Carrasco)	Agencia Nacional de Aguas (Valdemar S. Guimarães, Augusto Bragança)	Entidad Binacional Yacyretá (Lucas Chamorro); Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción (Cristián Escobar)	UDELAR (Luis Silveira, Jimena Alonso); MVOTMA (Luis Reolón, Gabriel Yorda, Javier Martínez, Juan Carlos Giacri, Adriana Piperno) CECOED Artigas (Juan José Eguillor)
Radars				
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Juan Carlos Bertoni, Carlos Lacunza)	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Gualberto Carrasco)	Centro Nacional de Monitoreo y Alertas de Desastres Naturales (Carlos Frederico de Angelis)	Dirección de Meteorología e Hidrología (Julián Baez)	UDELAR (Gabriel Cazes); INUMET (Daniel Bonora, Néstor Santayana); CTM-SG (Juan Badagian)
Modelos de Grandes Cuencas				
Instituto Nacional del Agua (Juan Borús)	Servicio Nacional de Hidrografía Naval (Luis Miguel Carrasco)	Instituto de Investigaciones Hidráulicas (Walter Collischonn)	Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción (Cristián Escobar, Pedro Takahashi)	UDELAR (Christian Chreties)



**FONDO PARA EL MEDIO
AMBIENTE MUNDIAL - FMAM**
GLOBAL ENVIRONMENT FACILITY - GEF

El FMAM promueve la cooperación internacional y fomenta medidas encaminadas a proteger el medio ambiente de nuestro planeta. Desde su creación, se ha convertido en un agente catalizador y fuente de financiamiento para considerar en forma integrada problemas ambientales mundiales en el proceso de desarrollo, lo que resulta decisivo para conseguir un equilibrio sostenible entre el hombre y la naturaleza. Aportó los fondos no reembolsables con los que se financió el Programa Marco.



**PROGRAMA DE NACIONES
UNIDAS PARA EL MEDIO
AMBIENTE**
UNITED NATIONS ENVIRONMENT
PROGRAMME - UN ENVIRONMENT

El Programa dirige y alienta la participación en el cuidado del medio ambiente, inspirando, informando y dando a las naciones y a los pueblos los medios para mejorar su capacidad de vida sin poner en peligro a las futuras generaciones. En la estructura organizativa del Programa Marco ha sido la agencia de implementación del GEF, habiendo sido su objetivo asegurar que el mismo se ejecutara para el beneficio del medio ambiente global. Miembro del Consejo Director del Proyecto.



**ORGANIZACIÓN DE LOS
ESTADOS AMERICANOS - OEA**
ORGANIZATION OF
AMERICAN STATES - OAS

La OEA ha mantenido una histórica relación de cooperación técnica con la Cuenca del Plata y con el CIC en temas relativos al desarrollo sostenible, a los recursos naturales y a la gestión de los recursos hídricos. Para la preparación del Programa Marco de la Cuenca del Plata fue la organización regional seleccionada, tanto por el PNUMA como por el CIC, como agencia ejecutora, responsable técnica y administrativa de los fondos FMAM. Miembro del Consejo Director del Proyecto.

Programa Marco

FMAM - GEF

Christian Severin
Especialista Principal en Medio Ambiente

UN ENVIRONMENT

Isabelle Van Der Beck
Gerente de Programa

OEA - OAS

Cletus Springer
Director del Departamento
de Desarrollo Sostenible (DDS)

Maximiliano Campos
Jefe Sección II, Gestión Integrada
de Recursos Hídricos

Enrique Bello
Jefe Unidad Técnica Administrativa
SG/OEA Argentina

DIRECTOR DE PROYECTO

Miguel Ángel López Arzamendia (2010-2011)
José Luis Genta (2011-2015)
Alejandro Peyrou (2015-2016)

COORDINADORA TÉCNICA INTERNACIONAL

Silvia Rafaelli (2011-2016)

COORDINADORA TÉCNICA ADJUNTA

Elena Benitez Alonso (2011-2013)
Ana Maria Castillo Clerici (2013-2016)

ASISTENTES TÉCNICOS

Ignacio Masson (2011-2014)
Julia Lacal Bereslawski (2011-2016)
Eduardo Roude (2011-2016)
Valeria Rodríguez Brondo (2011-2014)
Fabián Riveros (2011-2012)
Romina Morbelli (2013-2016)
Marta Ayala (2014-2016)
Martín Ribeiros (2014)
Roberto Montes (2015)

SECRETARIAS

Aliene Zardo Ferreira (2011)
Danielle Carvalho (2011-2012)
Lourdes Martins (2012-2015)
María Paula Giorgieri (2015-2016)

Publicaciones del Programa Marco

Documentos principales

Versiones en español, portugués e inglés



Análisis Diagnóstico Transfronterizo de la Cuenca del Plata ADT



Programa de Acciones Estratégicas de la Cuenca del Plata PAE



Análisis Diagnóstico Transfronterizo (ADT) y Programa de Acciones Estratégicas (PAE)
Síntesis ejecutiva



Programa Marco de la Cuenca del Plata
Proceso de ejecución y principales resultados

Documentos temáticos



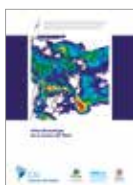
Sistema soporte para la toma de decisiones de la Cuenca del Plata



Marco institucional y legal para la gestión integrada de los recursos hídricos en la Cuenca del Plata



Participación pública, comunicación y educación
Proyectos del Fondo de Participación Pública
Réplica del Programa Cultivando Agua Buena



Hidroclimatología de la Cuenca del Plata



Balance hídrico en la Cuenca del Plata
Disponibilidad y usos, considerando escenarios futuros
Modelos de gestión



**Calidad del agua
en la Cuenca del Plata**



**Aguas subterráneas
en la Cuenca del Plata**



**Ecosistemas acuáticos
en la Cuenca del Plata**



**Inventario de Regiones
de Humedales de
la Cuenca del Plata**



**Degradación de tierras
en la Cuenca del Plata**



**Selva Misionera
Paranaense**



**Hidroelectricidad
y navegación en
la Cuenca del Plata**



**Tecnologías limpias
y ecoturismo
en la Cuenca del Plata**



**Buenas prácticas
en el uso del suelo
en la Cuenca del Plata**



**Boas práticas
para o cultivo do arroz
na Bacia do Prata**



**Proyecto Piloto Demostrativo
Conservación de la biodiversidad
íctica en una zona regulada
del río Paraná**



**Proyecto Piloto Demostrativo
Resolución de conflictos por
el uso del agua en la cuenca
del río Cuareim/Quaraí**



**Proyecto Piloto Demostrativo
Sistema de alerta hidroambiental
en la confluencia de los ríos
Paraguay y Paraná**



**Proyecto Piloto Demostrativo
Control de contaminación
y erosión en el río Pilcomayo**



Programa Marco para la gestión sostenible de los recursos hídricos de la Cuenca del Plata, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático
Programa Marco para gestão sustentável dos recursos hídricos da Bacia do Prata, considerando os efeitos decorrentes da variabilidade e mudanças do clima



CIC
Cuenca del Plata



FONDO PARA EL MEDIO
AMBIENTE MUNDIAL



Programa de las Naciones
Unidas para el Medio Ambiente



OEA
Nos unimos por una mejor