



AQUÍFERO GUARANI

SÍNTESE HIDROGEOLÓGICA
DO SISTEMA AQUÍFERO
GUARANI

ACUÍFERO GUARANÍ

SÍNTESIS HIDROGEOLÓGICA
DEL SISTEMA ACUÍFERO
GUARANÍ



Série Manuais e Documentos Técnicos do
Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento
Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní

Serie Manuales y Documentos Técnicos del
Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo
Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní

5



**Projeto para a Proteção Ambiental
e Desenvolvimento Sustentável
do Sistema Aquífero Guaraní
Proyecto para la Protección
Ambiental y Desarrollo Sostenible
del Sistema Acuífero Guaraní**



Projeto para a Proteção Ambiental
e Desenvolvimento Sustentável
do Sistema Aquífero Guarani
Proyecto para la Protección
Ambiental y Desarrollo Sostenible
del Sistema Acuífero Guarani



Síntese Hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani

Síntesis Hidrogeológica del Sistema Acuífero Guarani



**Série "Manuais e Documentos Técnicos do Projeto de Proteção Ambiental
e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani"**

**Serie "Manuales y Documentos Técnicos del Proyecto para la Protección Ambiental
y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guarani"**

Os resultados, interpretações, conclusões, denominações e opiniões presentes neste relatório e a forma como aparecem são de responsabilidade exclusiva do autor. Não representam juízos de valor sobre as condições jurídicas de países, territórios, cidades ou áreas, nem sobre as atividades diversas e a delimitação de fronteiras e limites estabelecidos pelos países. Tampouco representa a opinião da Secretaria Geral da Organização dos Estados Americanos (SG/OEA) ou da Secretaria Geral do Projeto SAG.

Fica autorizada a reprodução e a difusão do conteúdo deste livro para fins educativos e não comerciais e sem prévia autorização escrita, desde que haja referência expressa à fonte.

Los resultados, interpretaciones, conclusiones, denominaciones y opiniones presentes en este informe y la forma como aparecen son una contribución técnica para la difusión de los conocimientos del Sistema Acuífero Guaraní. No representan juicios de valor sobre las condiciones jurídicas de países, territorios, ciudades o áreas, ni sobre las actividades diversas y la delimitación de fronteras y límites establecidos por los países. Tampoco representa la opinión de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (SG/OEA).

Queda autorizada la reproducción y difusión del contenido de este libro para fines educativos y no comerciales y sin previa autorización por escrito, siempre y cuando se cite claramente la fuente.

PREFÁCIO

O Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní é uma iniciativa da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai para aumentar o conhecimento referente ao aquífero e propor medidas de caráter técnico, legal e institucional para sua gestão sustentável. O projeto contou com o apoio de fundos de doação provenientes do Fundo para o Meio Ambiente Mundial (GEF por sua sigla em inglês), que foram implementados pelo Banco Mundial e executados pela Organização dos Estados Americanos (OEA). Foi executado no período 2003-2009 segundo componentes e atividades previamente definidos.

O mesmo foi organizado em sete componentes com atividades inter-relacionadas que permitiram caracterizar o sistema Aquífero Guaraní em função de suas particularidades e comportamento hidrogeológico, seu aproveitamento e preservação, seu relacionamento com comunidades e instituições, em particular pelas necessidades de planejamento e ordenamento territorial para melhorar a gestão sustentável de suas águas.

No componente do conhecimento, foi prevista a execução da Série “Manuais e Documentos Técnicos”, com a consequente iniciativa de que todos os produtos obtidos em forma de dados e conhecimento devem ser traduzidos e compatibilizados com termos práticos e concretos, que sirvam ou orientem convenientemente aos gestores, legisladores e políticos para poder preparar e aplicar com bases técnicas sólidas, as regulamentações necessárias para o gerenciamento, regulação e proteção do Sistema Aquífero Guaraní.

Agradeço a contribuição dos técnicos e autores do Consórcio Aquífero Guaraní, em especial de Alberto Manganelli pelo trabalho de compilação da Síntese Hidrogeológica e de Jorge Santa Cruz pelo trabalho de supervisão dos documentos da presente Série.

PRÓLOGO

El Proyecto de Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní es una iniciativa de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay para aumentar el conocimiento referente al acuífero y proponer medidas de carácter técnico, legal e institucional para su gestión sostenible. El proyecto contó con el apoyo de los fondos de donación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por su sigla en inglés), que fueron implementados por el Banco Mundial y ejecutados por la Organización de los Estados Americanos (OEA). Fue ejecutado en el período 2003-2009 siguiendo componentes y actividades previamente definidas.

Fue organizado en siete componentes con actividades interrelacionadas que permitieron caracterizar el sistema Acuífero Guaraní en función de sus particularidades y comportamiento, hidrogeológico, su aprovechamiento y preservación, su relación con comunidades e instituciones, en particular las necesidades de planificación y ordenamiento del territorio para mejorar la gestión sostenible de sus aguas.

En el componente del conocimiento se inscribe la ejecución de la Serie “Manuales y Documentos Técnicos”, consecuentemente con la iniciativa de que todos los productos obtenidos en forma de datos y conocimiento deben ser traducidos y compatibilizados con términos prácticos y concretos que sirvan u orienten convenientemente a los gestores, legisladores y políticos para poder aplicar técnicamente, con bases técnicas sólidas, las normas necesarias para el manejo, regulación y protección del Sistema Acuífero Guaraní.

Agradezco la contribución de los técnicos y autores del Consorcio Acuífero Guaraní, en especial de Alberto Manganelli por el trabajo de recopilación de la Síntesis Hidrogeológica y de Jorge Santa Cruz por el trabajo de supervisión de los documentos de la presente Serie.

Luiz Amore
Secretário Geral do Projeto
Secretario General del Proyecto

PREFÁCIO

A maior parte do Sistema Aquífero Guarani (SAG) encontra-se sob confinamento. Seus setores de afloramento são principalmente de recarga, havendo alguns casos de descarga subterrânea. Os setores mais profundos apresentam artesianismo e temperaturas de origem geotérmica de 60 °C ou mais.

O estudo do SAG foi feito de forma interdisciplinar. Foram aplicadas metodologias e tecnologias geológicas, petrológicas, petrofísicas, geofísicas, hidrogeológicas, hidroquímicas e isotópicas. Além disso, foram realizados estudos complementares de hidrometeorologia, hidrologia superficial e modelação matemática, entre outros. Esse complexo sistema aquífero exige um conhecimento detalhado e concreto das características de cada um de seus setores.

A gestão sustentável das águas subterrâneas requer conhecimento atualizado sobre esse recurso. O conhecimento deve ser transmitido à sociedade, incentivando sua participação e melhorando sua relação com a ciência e a tecnologia. Esse é o propósito destes manuais e guias de procedimentos, elaborados por profissionais especializados e de prestígio.

A realização de estudos detalhados sobre os elementos do ciclo hidrológico nas áreas florestadas, especialmente sobre os afloramentos de materiais geológicos arenosos do SAG (possíveis áreas de recarga), resolve o *deficit* metodológico existente nos campos da hidrogeologia e da hidrologia. A percolação, a infiltração, o movimento da água em zonas não saturadas (ZNS), a interceptação da chuva pela folhagem, a qualidade da água infiltrada, as modificações no escoamento superficial e subsuperficial, as mudanças provocadas pelo desenvolvimento do ciclo vegetativo são alguns dos temas pesquisados e desenvolvidos neste Documento Técnico.

PRÓLOGO

El SAG presenta su mayor parte de cobertura territorial bajo confinamiento. Sus sectores aflorante pueden ser de recarga o en algunos casos de descarga subterránea. Los sectores más profundos presentan artesianismo y temperaturas de origen geotérmico de 60°C y aún más.

Su estudio fue encarado interdisciplinariamente aplicándose metodologías y tecnologías geológicas, petrológicas-petrofísicas, geofísicas, hidrogeológicas, hidroquímicas e isotópicas, habiéndose encarado también estudios complementarios de hidrometeorología, hidrología superficial y modelación matemática, entre otros. Se resalta la complejidad del Sistema y la necesidad del conocimiento a escalas de más detalle y aspectos concretos de las distintas problemáticas existentes a nivel más sectorial.

Desde el momento que la Gestión Sustentable del Agua Subterránea implica también un conocimiento actualizado del Recurso y una transferencia a la sociedad para participar en la mejora de la relación: C y T / Sociedad, es que se encaró la realización de estos Manuales y Guías de procedimientos por prestigiosos profesionales especializados.

La aplicación de métodos de estudios detallados del comportamiento de los elementos del ciclo hidrológico en áreas forestadas, especialmente sobre los materiales geológicos arenosos aflorantes del SAG (posibles áreas de recarga), cubre un déficit metodológico existente en las áreas del conocimiento hidrogeológico e hidrológico en ese sentido. Elementos como percolación e infiltración, movimiento del agua en la zona no saturada (ZNS), efecto de la interceptación de la lluvia por el follaje, calidad del agua infiltrada, modificaciones en el escurrimiento superficial y subsuperficial, cambios a través del desarrollo del ciclo vegetativo, y otros, son los aspectos a ser investigados en este tipo de tecnologías y desarrollados en este Documento Técnico.

Jorge Néstor Santa Cruz
Coordenador técnico 1 e 6 do Projeto SAG
Coordinador Técnico 1 y 6 del Proyecto SAG

Equipe do Projeto para a Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní em 2009

Responsáveis Nacionais:

Por Argentina: Fabián López
Por Brasil: Vicente Andreu Guillo
Por Paraguai: José Luis Casaccia
Por Uruguai: José Luis Genta

Coordenadores Nacionais:

Por Argentina: Miguel Ángel Giraut
María Josefa Fioriti (Coordenadora Adjunta)
María Santi (Coordenadora Adjunta)
Por Brasil: João Bosco Senra
Adriana Niemeyer Pires Ferreira (Suplente)
Por Paraguai: Amado Insfrán Ortíz
Por Uruguai: Lourdes Batista
Juan Ledesma (Suplente)

Representantes da OEA:

Cletus Springer
Jorge Rucks
Enrique Bello
Beatriz Santos
Lydia Ugas

Representantes do Banco Mundial:

Douglas Olson
Abel Mejía
Karin Kemper
Samuel Taffesse

Membros da Secretaria Geral:

Secretário-Geral: Luiz Amore
Coord. Técnico: Jorge N. Santa Cruz
Coord. Técnico: Daniel H. García Segredo
Coord. de Comunicação: Roberto Montes
Coord. de Administração: Luis Reolón
Assistente Técnico: Alberto Manganelli
Auxiliar Administrativa: Virginia Vila
Auxiliar Administrativo: Mathias González
Informática: Diego Lupinacci
Secretaria Técnica Administrativa: Rossana Obispo
Secretaria Bilingüe: Patricia Guianze

Facilitadores dos Projetos Piloto:

Concordia – Salto: Enrique Massa Segui
Rivera – Santana: Achylles Bassedas
Itapúa: Alicia Eisenkölbl
Ribeirão Preto: Mauricio dos Santos

Organismos e Entidades de Apoio:

Agência Internacional de Energia Atômica
Serviço Geológico Alemão

Equipe Técnica de Editoração e Produção Gráfica:

TDA Comunicação

Equipo del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en 2009

Responsables Nacionales:

Por Argentina: Fabián López
Por Brasil: Vicente Andreu Guillo
Por Paraguay: José Luis Casaccia
Por Uruguay: José Luis Genta

Coordinadores Nacionales:

Por Argentina: Miguel Ángel Giraut
María Josefa Fioriti (Co-coordinadora)
María Santi (Co-coordinadora)
Por Brasil: João Bosco Senra
Adriana Niemeyer Pires Ferreira (Alternativa)
Por Paraguay: Amado Insfrán Ortíz
Por Uruguay: Lourdes Batista
Juan Ledesma (Alternativo)

Representantes de OEA:

Cletus Springer
Jorge Rucks
Enrique Bello
Beatriz Santos
Lydia Ugas

Representantes Banco Mundial:

Douglas Olson
Abel Mejía
Karin Kemper
Samuel Taffesse

Integrantes de la Secretaría General:

Secretario General: Luiz Amore
Coord. Técnico: Jorge N. Santa Cruz
Coord. Técnico: Daniel H. García Segredo
Coord. Comunicación: Roberto Montes
Coord. de Administración: Luis Reolón
Asistente técnico: Alberto Manganelli
Auxiliar Administrativa: Virginia Vila
Auxiliar Administrativo: Mathias González
Informática: Diego Lupinacci
Secretaria Técnica Administrativa: Rossana Obispo
Secretaria Bilingüe: Patricia Guianze

Facilitadores proyectos piloto:

Concordia – Salto: Enrique Massa Segui
Rivera – Santana: Achylles Bassedas
Itapúa: Alicia Eisenkölbl
Ribeirão Preto: Mauricio dos Santos

Organismos y Entidades de Apoyo:

Organismo Internacional de Energía Atómica
Servicio Geológico Alemán

Equipo Técnico de Editoración y Producción Gráfica:

TDA Comunicación

ÍNDICE GERAL

1 INTRODUÇÃO	11
2 ANTECEDENTES	11
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	19
4 HIDROGEOLOGIA	59
5 MODELO REGIONAL	84
6 CONCLUSÕES	87
7 REFERÊNCIAS	89
8 ANEXO: EXPERIÊNCIAS LOCAIS – OS PROJETOS-PILOTO	90

ÍNDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN	11
2 ANTECEDENTES	11
3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA	19
4 HIDROGEOLOGIA	59
5 MODELO REGIONAL	84
6 CONCLUSIONES	87
7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	89
8 ANEXO: EXPERIENCIAS LOCALES – LOS PROYECTOS PILOTO	90

1 INTRODUÇÃO

A execução do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní foi o resultado de um acordo de cooperação assinado entre os governos da Argentina, do Brasil, do Paraguai e do Uruguai, do apoio financeiro do *Global Environment Facility* (GEF), de outros doadores e da cooperação técnica e financeira do Banco Mundial (BM), agência executora dos fundos GEF, e da Secretaria-Geral da Organização dos Estados Americanos (SG/OEA), agência executora regional.

Um dos objetivos do Projeto foi ampliar e consolidar o conhecimento técnico e científico acerca do Sistema Aquífero Guaraní (SAG), mediante estudos básicos de geologia, geofísica, hidroquímica, entre outros, que permitissem definir a geometria do aquífero, seus limites (principalmente o limite ocidental), sua hidrodinâmica e suas vulnerabilidades.

A ampliação do conhecimento acerca do SAG permitirá propor bases técnicas, jurídicas e institucionais para sua gestão coordenada entre Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, visando à sua preservação.

Este trabalho apresenta uma síntese do conhecimento atual acerca do Sistema Aquífero Guaraní e tem como base os produtos técnicos elaborados por diferentes empresas e consultores que participaram do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guaraní.

Apesar de seu caráter técnico, este documento foi redigido em uma linguagem acessível. Isso permitirá que o público em geral o compreenda, sem deixar de lado a rigorosidade científica necessária.

2 ANTECEDENTES

O nome “Aquífero Guaraní” é uma homenagem aos povos que habitavam a região do aquífero. Essa denominação foi proposta em uma reunião realizada na cidade de Curitiba, Brasil,

1 INTRODUCCIÓN

La ejecución del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní se produjo como consecuencia del acuerdo de cooperación alcanzado entre los gobiernos de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, el aporte financiero del Global Environment Facility (GEF) y otros donantes, y la cooperación técnica y financiera del Banco Mundial como agencia implementadora de los Fondos GEF y la Secretaría General de la Organización de Estados Americanos (SG/OEA) en su condición de agencia ejecutora regional.

Uno de los objetivos del Proyecto fue ampliar y consolidar el conocimiento técnico-científico existente sobre el SAG, mediante estudios básicos (geología, geofísica, hidroquímica, otros), de forma tal que permitieran definir la geometría del acuífero, sus límites (fundamentalmente el límite occidental); su hidrodinámica y vulnerabilidad.

Este aumento en el conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní, permitirá proponer un marco técnico, legal e institucional para su gestión coordinada entre Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, apuntando a su preservación.

El presente trabajo representa la síntesis del conocimiento actual del Sistema Acuífero Guaraní, basada en los productos técnicos elaborados por las diferentes empresas y consultores que participaron en el marco del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní.

Este documento, si bien de carácter técnico, está producido en un lenguaje accesible para la comprensión de su contenido por parte de no especialistas, sin perder por ello la necesaria rigurosidad científica.

2 ANTECEDENTES

El nombre de “Acuífero Guaraní” ha sido atribuido como forma de homenaje a los pueblos originarios que tradicionalmente habitaban su región de ocurrencia. Esa denominación fue propuesta en

no dia 26 de maio de 1996, e foi aceita pela comunidade científica presente.

Na verdade, a denominação “Sistema Aquífero Guarani” representa a evolução e a unificação da nomenclatura do que tinha sido identificado, entre os anos 1970 e 1990, como sendo o Aquífero Botucatu (GILBOA et al., 1976) e o Aquífero Gigante do Mercosul (ARAÚJO et al., 1995), além das denominações mais locais relacionadas às unidades estratigráficas que o constituem.

Gilboa et al. (1976) denominaram como “Aquífero Botucatu” aquele composto por formações arenosas dos períodos Jurássico e Triássico (145 a 230 milhões de anos) de origem eólica e lacustre e coberta por uma camada relativamente espessa de derramamentos basálticos.

Para Rebouças (1976), o Sistema Botucatu englobava o conjunto arenoso constituído pelas Formações Botucatu, Pirambóia e Rio do Rasto, entre outras formações cronologicamente relacionadas, como a Formação Santa Maria do Grupo Rosário do Sul, além dos membros Morro Pelado e Serrinha.

Araújo et al. (1995) adotam o nome “Aquífero Gigante do Mercosul” para denominar o Sistema Hidroestratigráfico Mesozóico, formado por rochas arenosas saturadas de água subjacentes ao conjunto de rochas da Formação Serra Geral, com origem no Triássico (Formação Pirambóia e Grupo Rosário do Sul, no Brasil; e Formação Buena Vista, no Uruguai) e no Jurássico (Formação Botucatu, no Brasil; Formação Misiones, no Paraguai; e Formação Tacuarembó, no Uruguai e na Argentina). Esse sistema ocupa aproximadamente 1.195.500 km² e sua espessura varia entre 200 e 800 metros.

Campos (2000) elaborou o Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guarani, na escala 1:2.500.000, associado a um modelo conceitual e matemático de fluxo para o aquífero. Na construção desse mapa, o autor considerou que o Sistema Aquífero está constituído pelas Formações Botucatu, Guará, Santa Maria, Sanga do Cabral, Pirambóia, Rio do Rasto/Membro Morro Pelado (Brasil); Tacuarembó, Buena Vista e Yaguari (Uruguai); Misiones e Independencia (Paraguai); San Cristóbal e Buena Vista (Argentina).

una reunión realizada en la ciudad de Curitiba, Brasil, el 26 de mayo de 1996 y fue aceptada por la comunidad científica presente.

En realidad, la denominación Sistema Acuífero Guaraní, representa la evolución y unificación de la nomenclatura de lo que ha sido identificado entre las décadas de 70 y 90, como Acuífero Botucatú (GILBOA et al., 1976) y Acuífero Gigante del Mercosur (ARAÚJO et al., 1995), aparte de denominaciones más locales relacionadas a sus unidades estratigráficas constituyentes.

Gilboa et al. (1976) denominaron como Acuífero Botucatú, aquel que estaría compuesto por las formaciones arenosas juró-triásicas (145 – 230 millones de años) de origen eólico y lacustre, sobrepuestas por una capa relativamente espesa de derrames basálticos.

Para Rebouças (1976) el Sistema Botucatú engloba el conjunto arenoso constituido por las formaciones Botucatú, Pirambóia y Rio do Rasto y otras formaciones cronológicamente relacionadas, como la Formación Santa María del Grupo Rosário do Sul, además de los miembros Morro Pelado y Serrinha

Araújo et al. (1995) definen el término Acuífero Gigante del Mercosur como la denominación formal del Sistema Hidroestratigráfico Mesozoico, constituido por un paquete de rocas arenosas, saturadas con agua, que ocurren subyacentes al conjunto de rocas de la Formación Serra Geral, comprendiendo estratos del Triásico (Formación Pirambóia y Grupo Rosário do Sul, en Brasil, Formación Buena Vista en Uruguay) y del Jurásico (Formación Botucatú en Brasil, Formación Misiones en Paraguay y Formación Tacuarembó en Uruguay y Argentina), con distribución en un área de aproximadamente 1.195.500 km² y espesores de 200 a 800 m.

Campos (2000) elaboró el Mapa Hidrogeológico del Acuífero Guaraní a escala 1:2.500.000, asociado a un modelo conceptual y matemático de flujo para el acuífero. El autor, para la construcción de estos productos, consideró el sistema acuífero constituido por las formaciones Botucatú, Guará, Santa María, Sanga do Cabral, Pirambóia, Rio do Rasto/Membro Morro Pelado (Brasil); Tacuarembó, Buena Vista y Yaguari (Uruguay); Misiones e Independencia (Paraguay); San Cristóbal y Buena Vista (Argentina).

Apesar da inexistência de dados piezométricos (nível da água segundo sua pressão no aquífero) para o Sistema Aquífero na época, Gilboa et al. (1976) inferiram a existência de recarga nas áreas de afloramento, com fluxo dirigido para o centro da bacia e em direção às zonas de descarga localizadas ao sul.

Segundo Araújo et al. (1995 e 1999), a compartimentação do fluxo das águas subterrâneas dentro do Sistema Aquífero estaria condicionado à existência de inúmeros diques de diabásio associados ao Arco de Ponta Grossa, que divide o aquífero em dois grandes domínios potenciométricos. O primeiro, localizado ao norte, possui zonas de recarga associadas aos afloramentos das Formações Botucatu e Pirambóia, com fluxo de águas preferencialmente em direção ao centro da bacia. O segundo domínio hidrogeológico, localizado ao sul do Arco de Ponta Grossa, com fluxo preferencialmente em direção ao oeste, com a zona de recarga localizada no Estado de Santa Catarina e a principal zona de descarga do aquífero situada ao longo dos Rios Paraná e Uruguai, não sendo descartada a existência de descarga ao longo do Rio Pelotas, em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul.

Campos (2000), em seu Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guaraní, representa as curvas isopiezométricas (igual nível de pressão) e as principais direções de fluxo indicando áreas de recarga associadas a zonas de afloramento de formações do Sistema Aquífero e zonas de descarga localizadas nas regiões de Entre Rios (Argentina), Rio Uruguai (Santa Catarina e Rio Grande do Sul) e Pontal do Paranapanema (São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná).

Durante a fase de preparação do Projeto Guaraní e com base no mapa hidrogeológico de Campos (2000), foi elaborado pela unidade brasileira de preparação do Projeto, com o apoio da comunidade técnico-científica, um mapa esquemático para o Sistema Aquífero Guaraní. Nele foram definidas as áreas de recarga (amarelo e verde) e de descarga (marrom) do SAG e as regiões onde existe a possibilidade de afloramento de suas águas por artesianismo, ou seja, onde a condição de pressão do aquífero permite que a água se eleve acima do nível da superfície do solo. Observa-se que, dado o fato

A pesar de la inexistencia de datos piezométricos (nivel del agua según su presión en el acuífero), para el sistema acuífero en la época, Gilboa et al. (1976) infirieron la existencia de recarga en las áreas de afloramiento, con flujo dirigido para el centro de la cuenca y en dirección a las zonas de descarga localizadas al sur.

Según Araújo et al. (1995 e 1999), el comportamiento del flujo de las aguas subterráneas dentro del sistema acuífero sería condicionado por la ocurrencia de innumerables diques de diabasa, asociados al Arco de Ponta Grossa, que divide el acuífero en dos grandes dominios potenciométricos. El primero, localizado al norte, posee zonas de recarga asociadas a los afloramientos de las formaciones Botucatu y Pirambóia, con flujo de aguas preferencialmente en dirección al centro de la cuenca. El segundo dominio hidrogeológico, localizado al sur del Arco de Ponta Grossa, con flujo dirigido preferencialmente de este para oeste, con la zona de recarga localizada en el estado de Santa Catarina, y la principal zona de descarga del acuífero situada a lo largo de los ríos Paraná y Uruguay, no siendo descartada la ocurrencia de descarga a lo largo del Rio Pelotas, en Santa Catarina y en Rio Grande do Sul.

Campos (2000) en su Mapa Hidrogeológico del Acuífero Guaraní, representa las curvas isopiezométricas (igual nivel de presión) y las principales direcciones de flujo, indicando áreas de recarga asociadas a las zonas de afloramiento de las formaciones constituyentes del sistema acuífero, y zonas de descarga localizadas en las regiones de Entre Ríos (Argentina), Rio Uruguay (Santa Catarina y Rio Grande do Sul) y Pontal do Paranapanema (São Paulo, Mato Grosso do Sul y Paraná).

Durante la fase de preparación del Proyecto Guaraní, y con base en el mapa hidrogeológico de Campos (2000), fue elaborado por la unidad brasilera de preparación del proyecto, con contribución de la comunidad técnico-científica, un mapa esquemático para el Sistema Acuífero Guaraní. En él fueron definidas las áreas de recarga (amarillo y verde) y de descarga (marrón) del SAG, y regiones donde existe la posibilidad de surgencia de sus aguas por artesianismo, es decir, que la condición de presión del acuífero permite el flujo de agua por encima del nivel de la superficie del suelo. Se observa que, en función de que los límites todavía no fueran conocidos en la época,

de os limites não serem conhecidos na época, a extensão do SAG no território argentino e paraguaio não foi completamente definida.

Diversos estudos hidroquímicos para a caracterização das águas do Sistema Aquífero Guarani foram realizados em porções específicas dele, sem a existência de trabalhos de compreensão do quadro hidroquímico regional. Esses estudos começaram no Estado de São Paulo, com o clássico trabalho de Silva (1983), cujos dados foram posteriormente utilizados por diversos autores (MENG; MAYNARD, 2001; SRACECK; HIRATA, 2002) que buscavam elaborar um modelo da evolução hidroquímica dessas águas para a porção nordeste da Bacia do Paraná.

Nesse contexto de trabalhos de alcance local e regional, foram produzidas, na parte sul do Sistema Aquífero, diversas teses de doutorado que geraram novos conhecimentos sobre o SAG em diferentes aspectos: geologia, hidrogeologia e hidroquímica. São exemplos de estudos: Silva Busso (1999), De Santa Ana (2004) e Flores Machado (2005).

Durante o desenvolvimento do Projeto foram realizados nove trabalhos de pesquisa relacionados ao Fundo de Universidades. Esses trabalhos envolveram 18 instituições da região e permitiram obter informação valiosa sobre diversas áreas do SAG.

la extensión del SAG en territorio argentino y paraguayo no fue completamente definida.

Diversos estudios hidroquímicos para la caracterización de las aguas del Sistema Aquífero Guarani fueron realizados en porciones específicas del acuífero, sin la existencia de trabajos de comprensión del cuadro hidroquímico regional. Estos estudios fueron iniciados en el Estado de São Paulo con el clásico trabajo de Silva (1983), cuyos datos fueron posteriormente retomados por diversos autores (MENG & MAYNARD, 2001; SRACECK & HIRATA, 2002), procurando la elaboración de un modelo de la evolución hidroquímica de estas aguas para la porción nordeste de la Cuenca del Paraná.

En este sentido, (trabajos de alcance local a semiregional) en la porción sur, se han producido diversos trabajos de tesis doctorales que han contribuido al conocimiento del SAG en diferentes aspectos: geología, hidrogeología, hidroquímica. A modo de ejemplo se pueden citar: Silva Busso (1999), De Santa Ana (2004), Flores Machado (2005).

Incluso durante el desarrollo del Proyecto se produjeron en el marco del denominado "Fondo de Universidades", 9 trabajos de investigación que involucraron 18 instituciones de la región y que permitieron obtener información relevante para diversas áreas de ocurrencia del SAG.

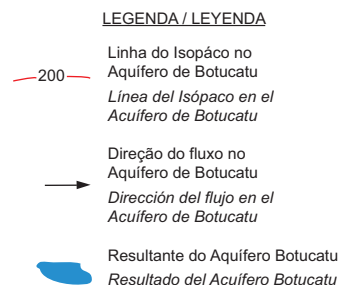
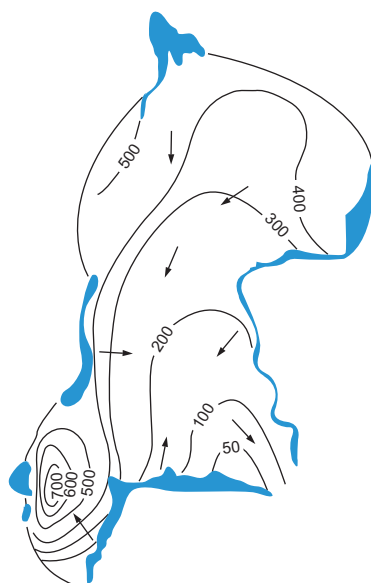


Figura 1.-

Mapa do isópaco e da direção do fluxo do Aquífero de Botucatu.
Fonte: Gilboa et al. (1976).

Figura 1.-

Isópaco mapa y la dirección del flujo del Acuífero de Botucatu.
Fuente: Gilboa et al. (1976).

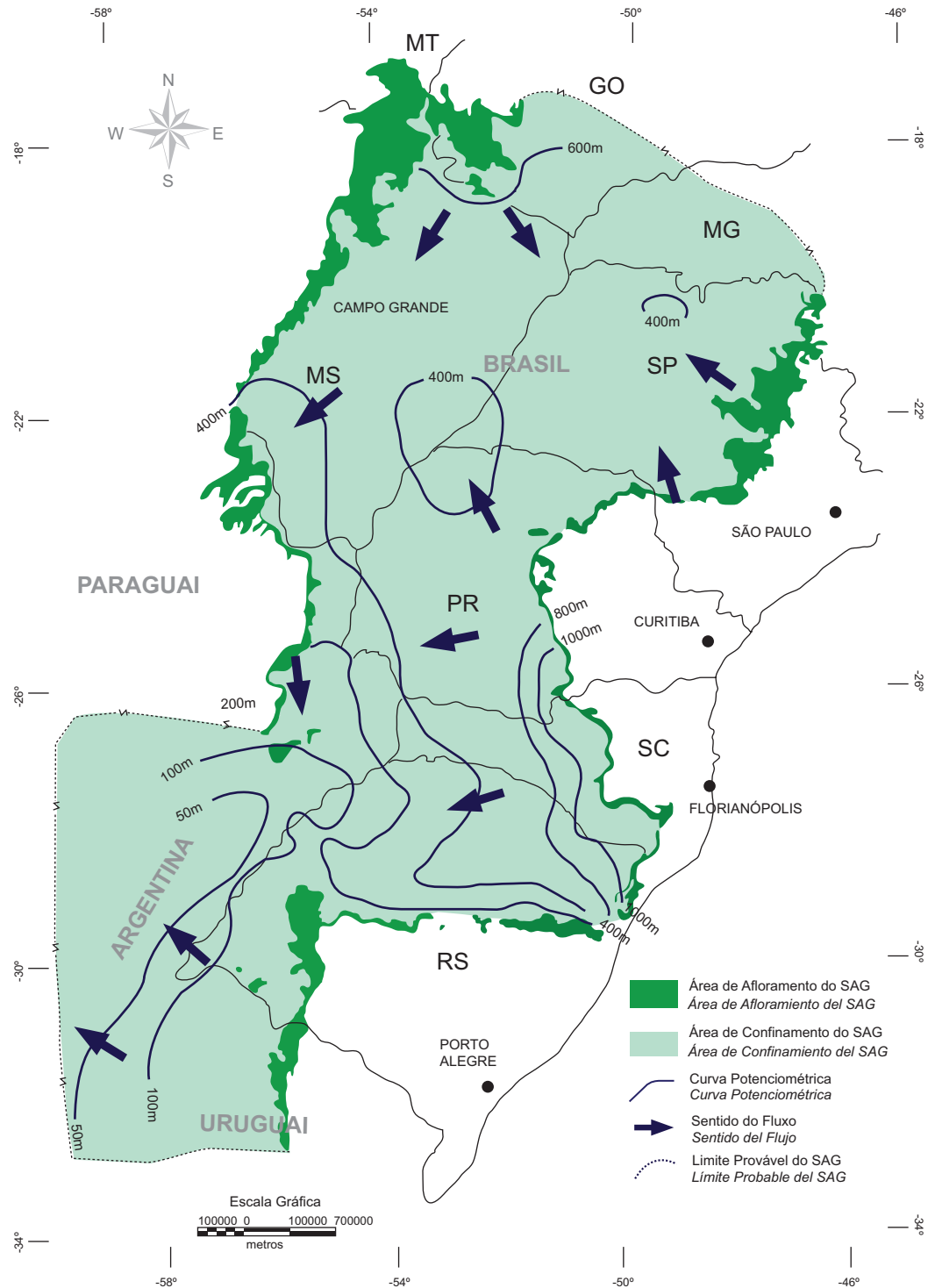


Figura 2.-
Compartimentação do Fluxo das águas Subterrâneas.
Fonte: Modificado de Araújo et al. (1995).

Figura 2.-
Comportamiento del Flujo de las aguas Subterráneas.
Fuente: Modificado de Araújo et al. (1995).

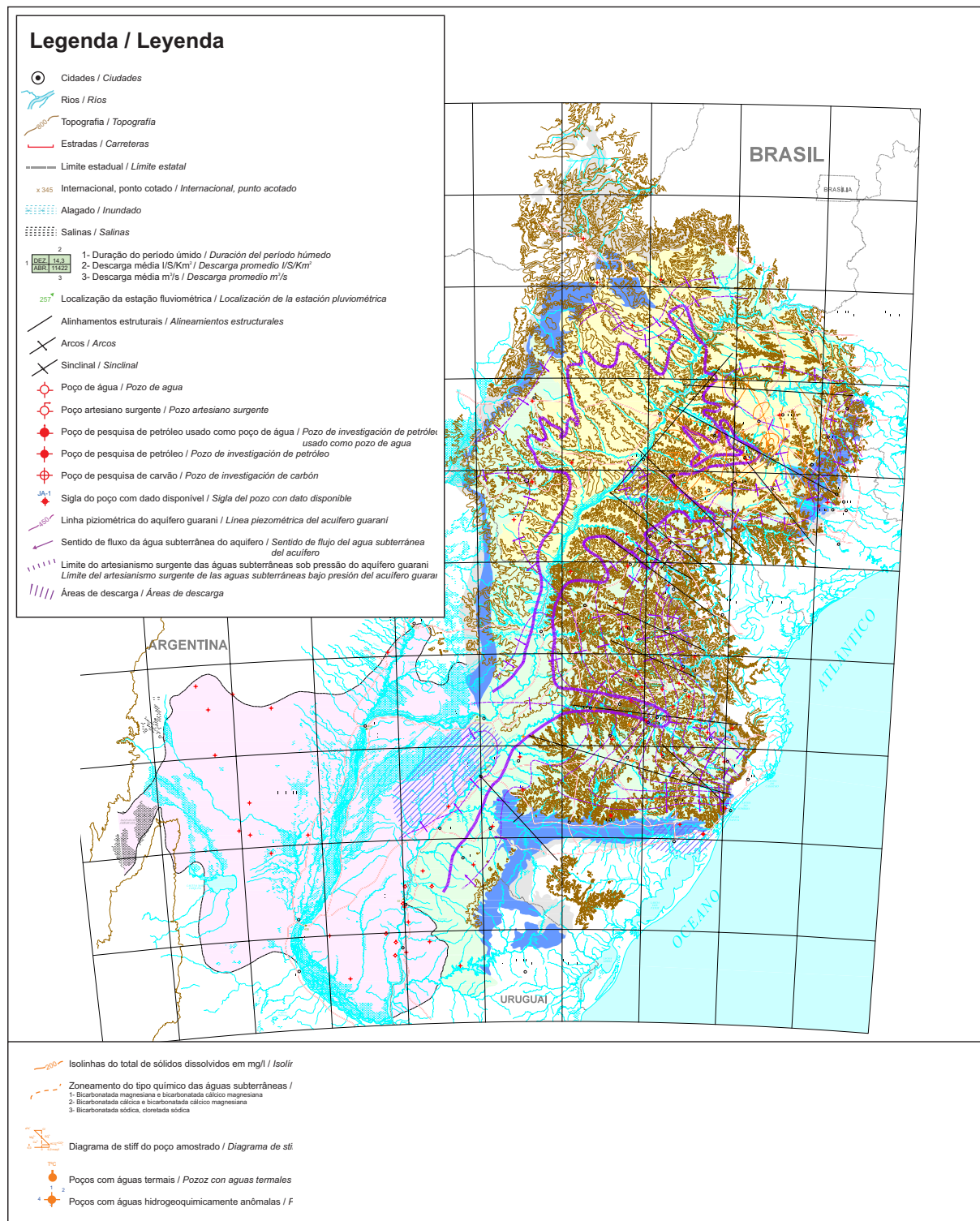
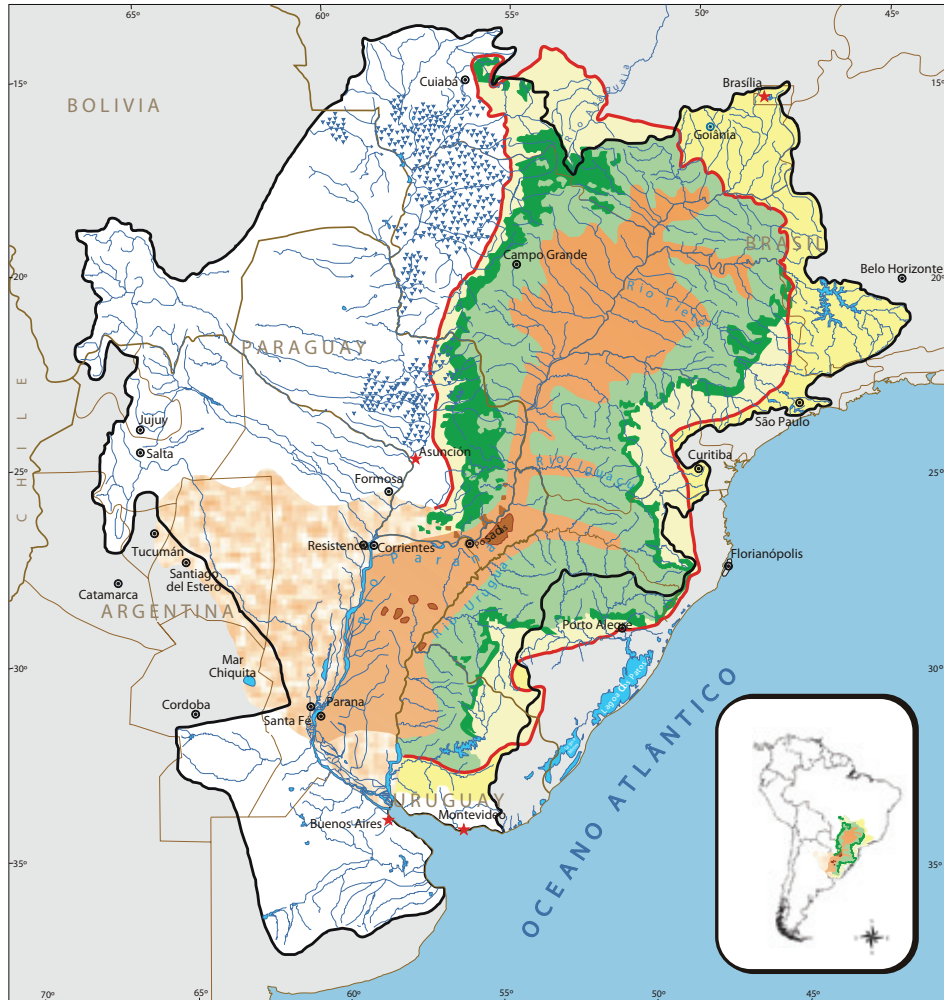
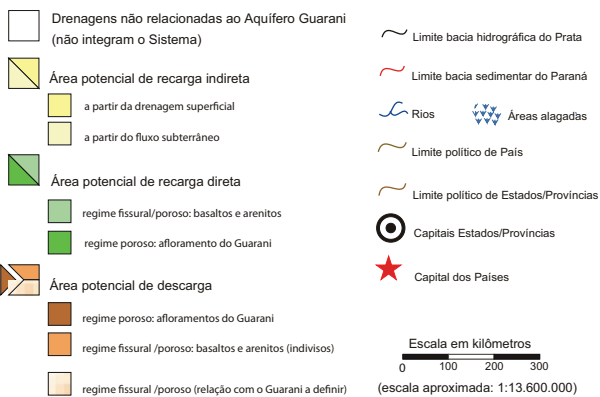


Figura 3.-
Mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani.
Fonte: Campos (2000).

Figura 3.-
Mapa hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní.
Fuente: Campos (2000).



LEGENDA



LEYENDA

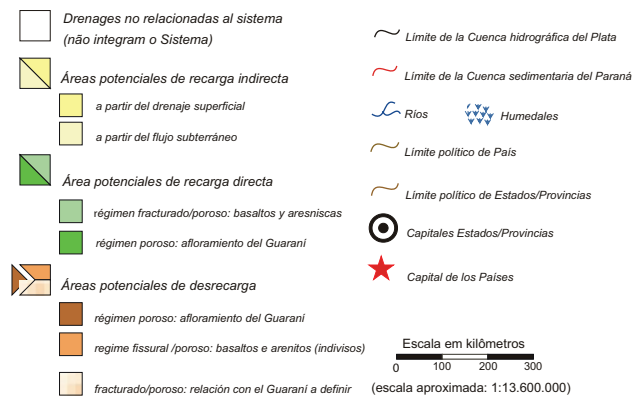


Figura 4.-
Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guaraní.
Fonte: UNEP Brasil, 2001.

Figura 4.-
Mapa esquemático del Sistema Acuífero Guaraní.
Fuente: UNEP Brasil, 2001.

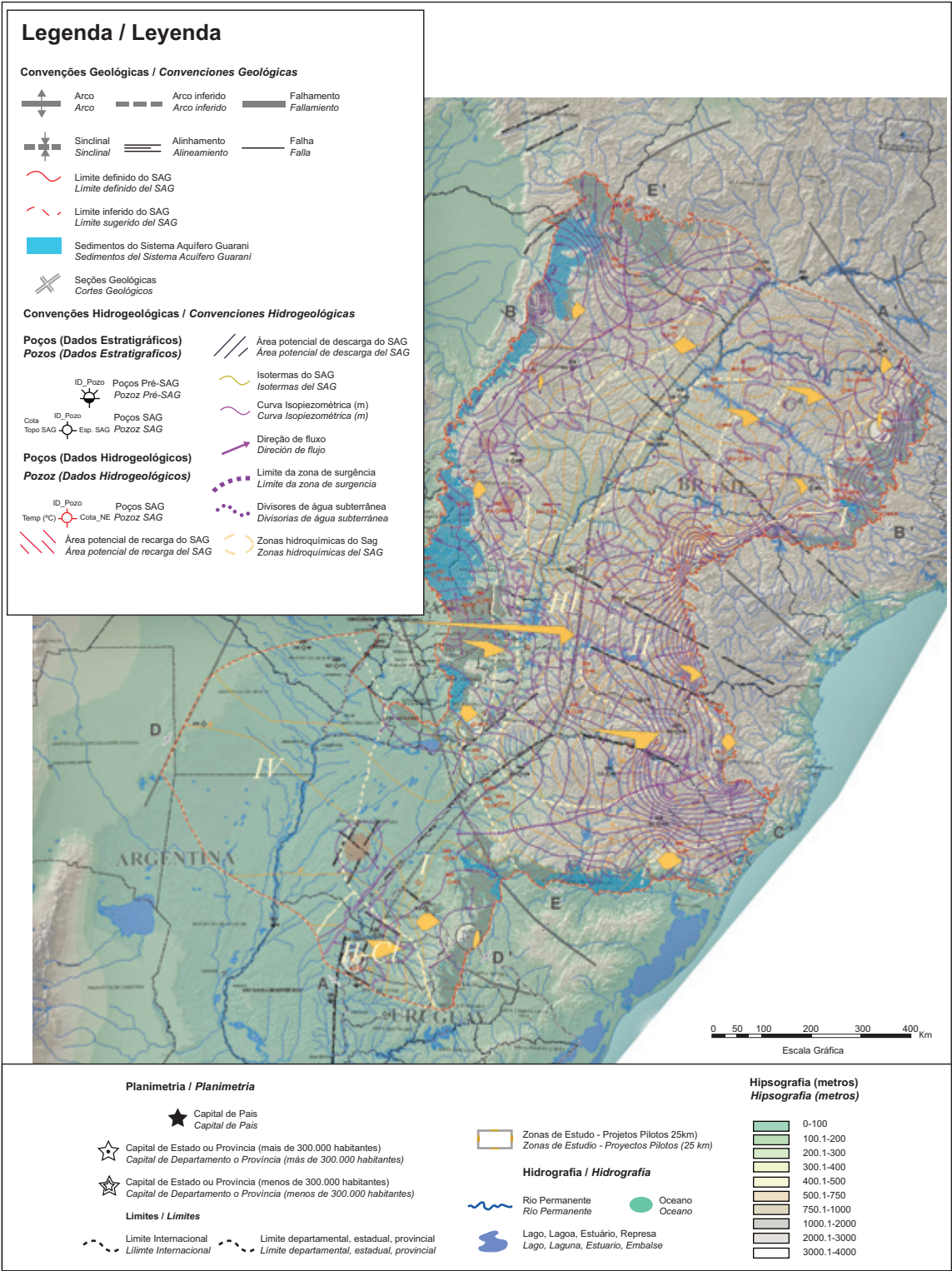


Figura 5.-
Mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani.

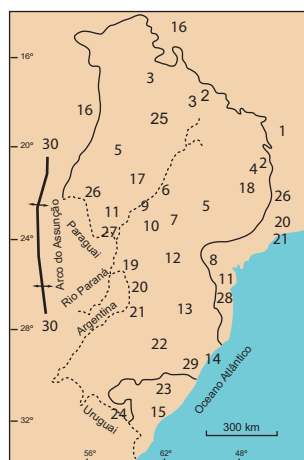
Figura 5.-
Mapa hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Contexto geológico (visão atual)

O Sistema Aquífero Guaraní é a unidade hidroestratigráfica mais importante da porção meridional do continente sul-americano e está associado ao conjunto de rochas sedimentares originadas da acumulação mecânica de partículas detríticas. Essas partículas, produzidas pela decomposição de rochas preexistentes, são denominadas de “siliciclásticos” (cascalho, areia, silte e argila). Engloba a Bacia do Paraná (Brasil e Paraguai), a Bacia Chacoparanaense (Argentina) e a Bacia Norte (Uruguai).

Dentro dessa extensa bacia sedimentaria, onde se encontram as unidades litoestratigráficas (rochas arenosas) que constituem o SAG, os principais elementos estruturais que controlam os diversos aspectos de geometria, compartimentação e arquitetura da camada sedimentar da bacia são: ao norte, os Arcos de Canastra e São Vicente; a oeste, o Arco de Assunção e o Arco Pampeano/Ponta; ao sul, o Arco do Rio da Prata. Na porção interior da bacia há importantes elementos estruturais, como o Arco de Ponta Grossa, o Arco do Rio Grande e o sinclinal de Torres, alguns já definidos por Zalán et al. (1990) e representados na figura 6.



Elementos estruturais NW –SE

1-Arco do alto Parnaíba 2- Flexura de Goiânia 3- Baixo de Ipiacú/Campina verde 4- Alto de Cardoso 5- Zona de falha de Guapiara 6- Falha de Santo Anastácio 7- Falha de São Gerônimo – Curiúva 8- Arco de ponta grossa 9- Zona de falha Curitiba 10- Falha do rio Alonzo 11- Zona de falha de Cândido de Abreu - Campo Mourão 12- Lineamento do Rio Piquiri 13- Zona de falha caçador 14- Sinclinal de Torres 15- Arco do Rio Grande

Elementos estruturais NW –SE

16- Zona de falha transbrasileiro 17- Lineamento de Araçatuba 18- Falha de Guaxupé 19- Falha de Jacutinga 20- Zona de falha de taxaquara 21- Zona de falha de Lancinha 22- Zona de falha de Blumenau - Soledade 23- Falha do Leão 24- Falha de Açotea

Elementos estruturais NW –SE

25- Lineamento de Cassilândia 26- Lineamento Mogi-Guaçu-Dourados 27- Lineamento de São Sebastião 28- Lineamento de Taquara Verde 29- Lineamento de Bento Gonçalves

Elementos estruturales NW –SE

1-Arco del alto Parnaíba 2- Flexura de Goiânia 3- Bajo de Ipiacú/Campina verde 4- Alto de Cardoso 5- Zona de falla de Guapiara 6- Falla de Santo Anastácio 7- Falla de Sao Gerônimo – Curiúva 8- Arco de Ponta Grossa 9- Zona de falla Curitiba 10- Falla del Río Alonzo 11- Zona de falla de Cândido de Abreu - Campo Mourão 12- Lineamiento del Río Piquiri 13- Zona de falla cazador 14- Sinclinal de Torres 15- Arco del Río Grande

Elementos estruturales NW –SE

16- Zona de falla transbrasileiro 17- Lineamiento de Araçatuba 18- Falla de Guaxupé 19- Falla de Jacutinga 20- Zona de falla de Taxaquara 21- Zona de falla de Lancinha 22- Zona de falla de Blumenau - Soledade 23- Falla do Leão 24- Falla de Açotea

Elementos estruturales NW –SE

25- Lineamiento de Cassilândia 26- Lineamiento Mogi-Guaçu-Dourados 27- Lineamiento de Sao Sebastião 28- Lineamiento de Taquara Verde 29- Lineamiento de Bento Gonçalves

3 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA

Contexto Geológico (visión actual)

El Sistema Acuífero Guaraní constituye la unidad hidroestratigráfica más importante de la porción meridional del continente suramericano, y está asociada al paquete de rocas formadas por sedimentos originados por la acumulación mecánica de partículas detríticas (producidas por descomposición de una roca) y que se denominan siliciclásticos, (gravas, arenas, limos y arcillas) de la Cuenca del Paraná (Brasil y Paraguay), Cuenca Chacoparanaense (Argentina) y Cuenca Norte (Uruguay).

Dentro de esa extensa cuenca sedimentaria, donde se encuentran las unidades litoestratigráficas (rocas arenosas) que constituyen el SAG, los principales elementos estructurales que controlan los diversos aspectos de la geometría, compartimentación y arquitectura del relleno sedimentario de la cuenca son: al norte, los arcos de Canastra y San Vicente, al oeste el arco de Asunción y el arco Pampeano/Puna, y al sur, el arco del Río de la Plata. En la porción interior de la cuenca son reconocidos importantes elementos estructurales como el arco de Ponta Grossa, el arco de Río Grande y el sinclinal de Torres, algunos ya definidos por Zalán et al. (1990) y representados en la figura 6.

Figura 6.-

Elementos estruturais.

Fonte: Modificado de ZALÁN et al., (1990).

Figura 6.-

Elementos estruturales.

Fuente: Modificado de ZALÁN et al., (1990).

En este amplio contexto geológico-estructural, el Sistema Acuífero Guaraní fue definido como aquel conjunto de rocas sedimentarias mesozoicas continentales clásticas que están presentes en las cuencas del Paraná y Chacoparanaense, limitado estratigráficamente (disposición de las capas), en su base por una discordancia regional permo-eotriásica (250 millones de años) y en el tope por los derrames basálticos de la Formación Serra Geral (aproximadamente 145- 130 millones de años).



Figura 7.-
Formación Tacuarembó – Botucatu.



Figura 8.-
Formação Pirambóia.

A adoção desse critério operacional de separação com base na estratigrafia, apesar de retirar do SAG algumas unidades tradicionalmente associadas ao sistema em trabalhos anteriores (REBOUÇAS, 1976; ARAÚJO et al., 1995; CAMPOS, 2000), tem como premissa a identificação de uma superfície erosiva no nível da base, de idade permotriássica, reconhecida em grande parte da Bacia do Paraná.

Essa superfície de discordância regional coloca o SAG em contato com unidades litoestratigráficas de características hidráulicas diferentes: na porção norte da bacia, a argila da Formação Corumbataí, e na porção sul, as unidades arenosas das Formações Rio do Rastro, Sanga do Cabral, Tacuary e Buena Vista (figura 11)

Figura 8.-
Formación Pirambóia.

La adopción de este criterio operativo de separación con fundamentación estratigráfica, a pesar de retirar del SAG algunas unidades tradicionalmente asociadas al sistema en trabajos anteriores (REBOUÇAS, 1976; ARAÚJO et al., 1995 e CAMPOS, 2000), tiene como premisa la identificación de una superficie erosiva a nivel de la base, de edad permo-eotriásica, reconocida en gran parte de la Cuenca del Paraná.

Esta superficie de discordancia regional coloca al SAG en contacto con unidades litoestratigráficas de características hidráulicas distintas (en la porción norte de la cuenca, las pelitas (arcillas) de la Formación Corumbataí, y en la porción sur las unidades arenosas de las Formaciones Rio do Rastro, Sanga do Cabral, Tacuary y Buena Vista). Figura 11

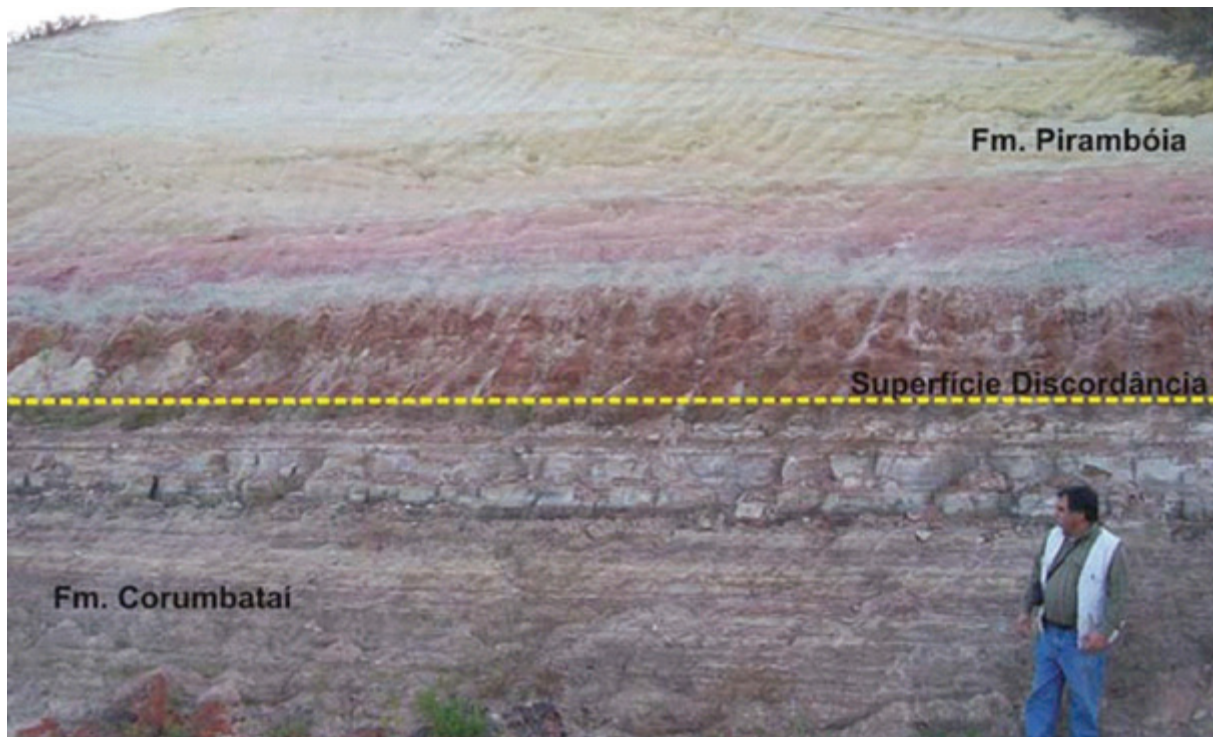


Figura 9.-
Discordância regional.

Figura 9.-
Discordancia regional.



Figura 10.-
Contato entre as Formações Botucatu – Serra Geral.
Observe o paleorrelevo das dunas eólicas cobertas pelos
derrames basálticos.

Figura 10.-
Contacto entre las Formaciones Botucatu – Serra Geral.
Obsérvese el paleorelieve de las dunas eólicas cubierto por
las coladas basálticas.

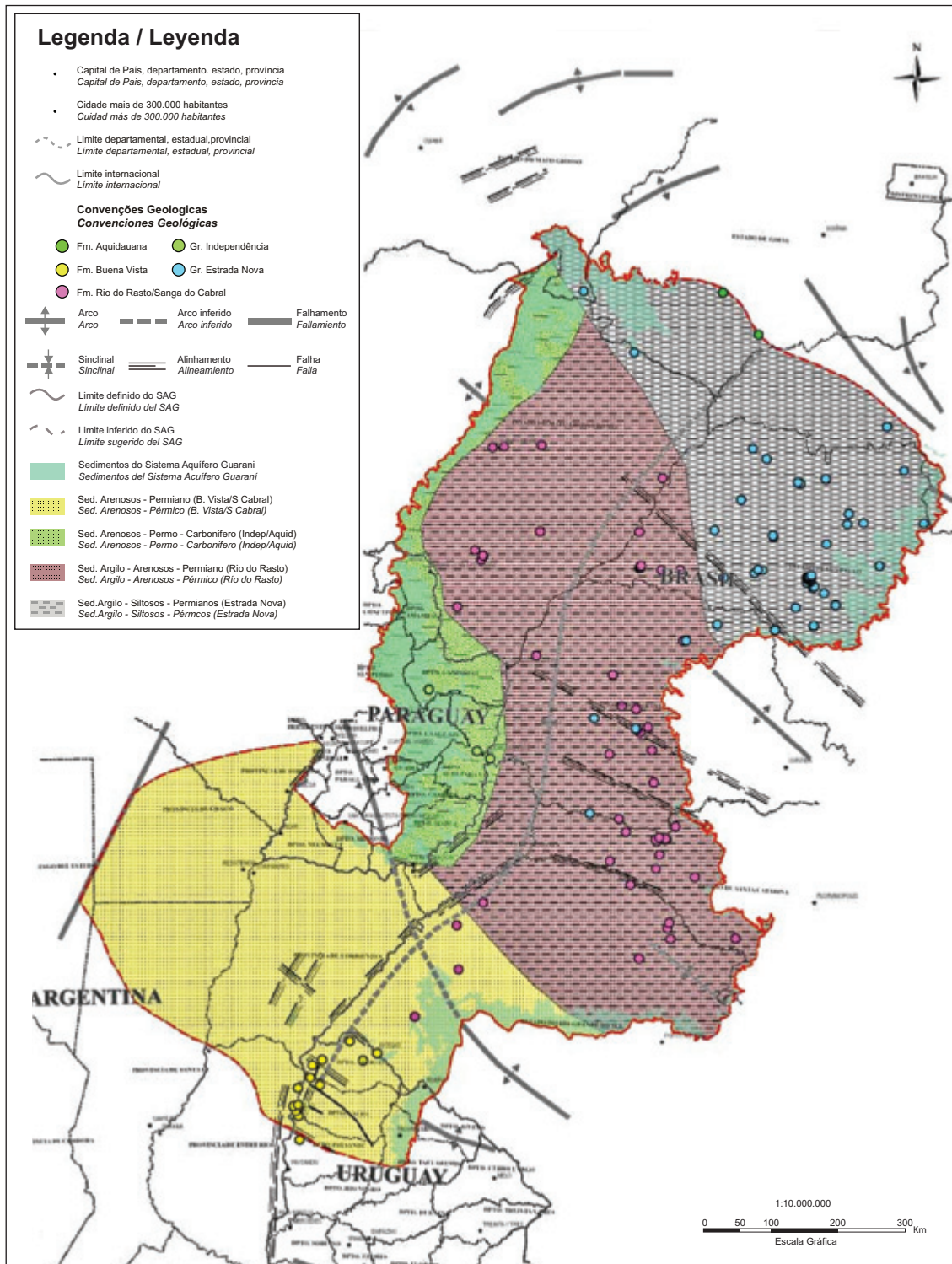


Figura 11.-
Formação Pirambóia.

Figura 11.-
Formación Pirambóia.

Paraguai	Argentina	Uruguai	Brasil (Sul)	Brasil (C-N)	Unidades aquíferas
Formação Alto Paraná	Formação Serra Geral (Curuzú Cuatiá) Formação Posadas/Solari	Formação Arapey	Formação Serra Geral	Grupo Bauru Formação Serra Geral	Pós-SAG
Formação Misiones	Formação Misiones (Formação Tacuarembó)	Formação Tacuarembó	Formações Botucatu/Guará Formação Caturrita Formação Santa Maria	Formação Botucatu Formação Pirambóia	↑ 130 milhões de anos SAG 250 milhões de anos ↓
Formação Tacuary Gr. Independência	Formação Buena Vista	Formação Buena Vista	Formação Sanga do Cabral	Formações Corumbataí/Rio do Rasto	Pré-SAG

Paraguay	Argentina	Uruguay	Brasil (Sur)	Brasil (C-N)	Unidades aquíferas
Formación Alto Paraná	Formación Serra Geral (Curuzú Cuatiá) Formación Posadas/Solari	Formación Arapey	Formación Serra Geral	Grupo Baurú Formación Serra Geral	Pos-SAG
Formación Misiones	Formação Misiones (Formação Tacuarembó)	Formación Tacuarembó	Formaciones Botucatú/Guará Formación Caturrita Formación Santa María	Formación Botucatú Formación Pirambóia	↑ 130 millones de años SAG 250 millones de años ↓
Formación Tacuary Gr. Independencia	Formación Buena Vista	Formación Buena Vista	Formación Sanga do Cabral	Formaciones Corumbataí/Río do Rasto	Pre-SAG

Definido dessa forma, a área total englobada pelos sedimentos que compõem o SAG é de 1.087.879,15 km², assim distribuídos: na Argentina, ocupa uma área de 228.255,26 km²; no Brasil, 735.917,75 km², distribuídos pelos Estados de Goiás (39.367,72 km²), Mato Grosso (7.217,57 km²), Mato Grosso do Sul (189.451,38 km²), Minas Gerais (38.585,20 km²), Paraná (119.524,47 km²), Rio Grande do Sul (154.680,82 km²), Santa Catarina (44.132,12 km²) e São Paulo (142.958,48 km²); no Paraguai, a área é de 87.535,63 km²; e no Uruguai, 36.170, 51 km², localizados entre os paralelos 16° e 32° S e os meridianos 47° e 60° W.

Portanto, os limites do SAG estão relacionados às áreas onde estão as unidades geológicas que o constituem, cujas zonas de afloramento apresentam-se nas extremidades leste e oeste da Bacia do Paraná. Na Região Sul do território brasileiro, no Estado do Rio Grande do Sul, essas unidades afloram em uma faixa leste-oeste. No nordeste do Uruguai, afloram em uma faixa quase norte-sul.

Neste trabalho não foram consideradas como áreas pertencentes ao SAG aquelas isoladas e sem conexão com o corpo principal, ainda que tenham sido incluídas no mapa esquemático da figura 4 na fase de preparação do Projeto. Um exemplo é a região da Chapada dos Guimarães, no Mato Grosso.

O limite norte do SAG foi inferido, pois não há zonas de afloramento nos Estados de Goiás e Minas Gerais, região onde o aquífero está coberto por rochas basálticas. Dados provenientes de poços perfurados no Estado de Goiás, nas cidades de Rio Verde e Quirinópolis, indicam que esse limite está marcado pela diminuição das espessuras das Formações Pirambóia e Botucatu, caracterizando um limite estratigráfico que coincide com o limite da bacia, a qual está marcada por estruturas de base responsáveis por sua elevação.

O limite sul do aquífero também se caracteriza pela escassez de afloramentos, principalmente no território argentino. Além disso, a quantidade insuficiente de poços não permite definir os limites do aquífero na região.

Definido de esta manera, el área total abarcada por los sedimentos que componen el SAG es de 1.087.879,15 km², así distribuidos: en la Argentina, ocupa un área de 228.255,26 km², en Brasil, 735.917,75 km², distribuidos por los estados de Goiás – 39.367,72 km²; Mato Grosso – 7.217,57 km²; Mato Grosso do Sul – 189.451,38 km²; Minas Gerais – 38.585,20 km²; Paraná – 119.524,47 km²; Rio Grande do Sul – 154.680,82 km²; Santa Catarina – 44.132,12 km² y São Paulo – 142.958,48 km²; en Paraguay, el área es de 87.535,63 km², y en Uruguay, 36.170, 51 km², localizado entre los paralelos 16° y 32°S y los meridianos 47° y 60°W.

Por lo tanto, los límites del SAG están relacionados a las áreas de ocurrencia de las unidades geológicas que lo constituyen, cuyas fajas de afloramientos se presentan en las extremidades este y oeste de la cuenca del Paraná y, en la región sur del territorio brasileiro, estas unidades afloran en una faja de dirección aproximada este-oeste, en el estado de Rio Grande do Sul y con dirección casi norte-sur en el noreste de Uruguay.

No fueron consideradas como áreas de ocurrencia del SAG, en este trabajo, zonas aisladas y sin conexión con el cuerpo principal, aunque fueran incluidas en el mapa esquemático de la figura 4, en la fase de preparación del Proyecto, como por ejemplo, la región de la Chapada dos Guimarães, en Mato Grosso.

El límite norte del SAG fue inferido, ya que no se observa la ocurrencia de áreas aflorantes en los estados de Goiás y Minas Gerais, región donde el acuífero está cubierto por rocas basálticas. Datos provenientes de pozos perforados en el estado de Goiás (Rio Verde y Quirinópolis) indican que este límite está marcado por la disminución de los espesores de las formaciones Pirambóia y Botucatu, caracterizando un límite estratigráfico, coincidente con el borde de la cuenca, marcada por estructuras del basamento responsables por su levantamiento.

El límite sur del acuífero también esta caracterizado por la escasez de afloramientos, principalmente en territorio argentino, así como por la cantidad insuficiente de pozos que permitan la definición de su terminación en esta región.



Figura 12.-
Limites do SAG.

A definição do limite sudoeste do SAG baseia-se no reconhecimento em subsuperfície das unidades constituintes do aquífero, principalmente a partir da avaliação de dados provenientes de poços de petróleo perfurados oportunamente na região da Bacia Chacoparanaense, no território argentino (figura 13). Esses dados foram parcialmente reavaliados durante a execução do projeto (LCV, 2008) e agregados ao reconhecimento dos principais elementos sismoestratigráficos por meio de estudos geofísicos de unidades do

Figura 12.-
Limites del SAG.

La definición del límite sudoccidental del SAG está basada en el reconocimiento de las unidades constituyentes del acuífero en el subsuelo, principalmente a partir de la evaluación de datos existentes, provenientes de pozos de petróleo perforados oportunamente en la región de la Cuenca Chacoparanaense, en territorio argentino (Figura 13). Los mismos fueron parcialmente reevaluados durante la ejecución del proyecto (LCV, 2008) y sumados al reconocimiento de los principales elementos a través de estudios geofísicos (elementos sismoestratigráficos) de las

SAG (ou equivalentes mesozóicos) depositados sobre a discordância permotriássica (250 milhões de anos) e estudos petrográficos que identificaram elementos mineralógicos concretos de correlação geológica.

unidades del SAG (o equivalentes mesozoicos) depositados sobre la discordancia permo-eotriásica (250 millones de años), y estudios petrográficos que permitieron aportar elementos mineralógicos concretos de correlación geológica.

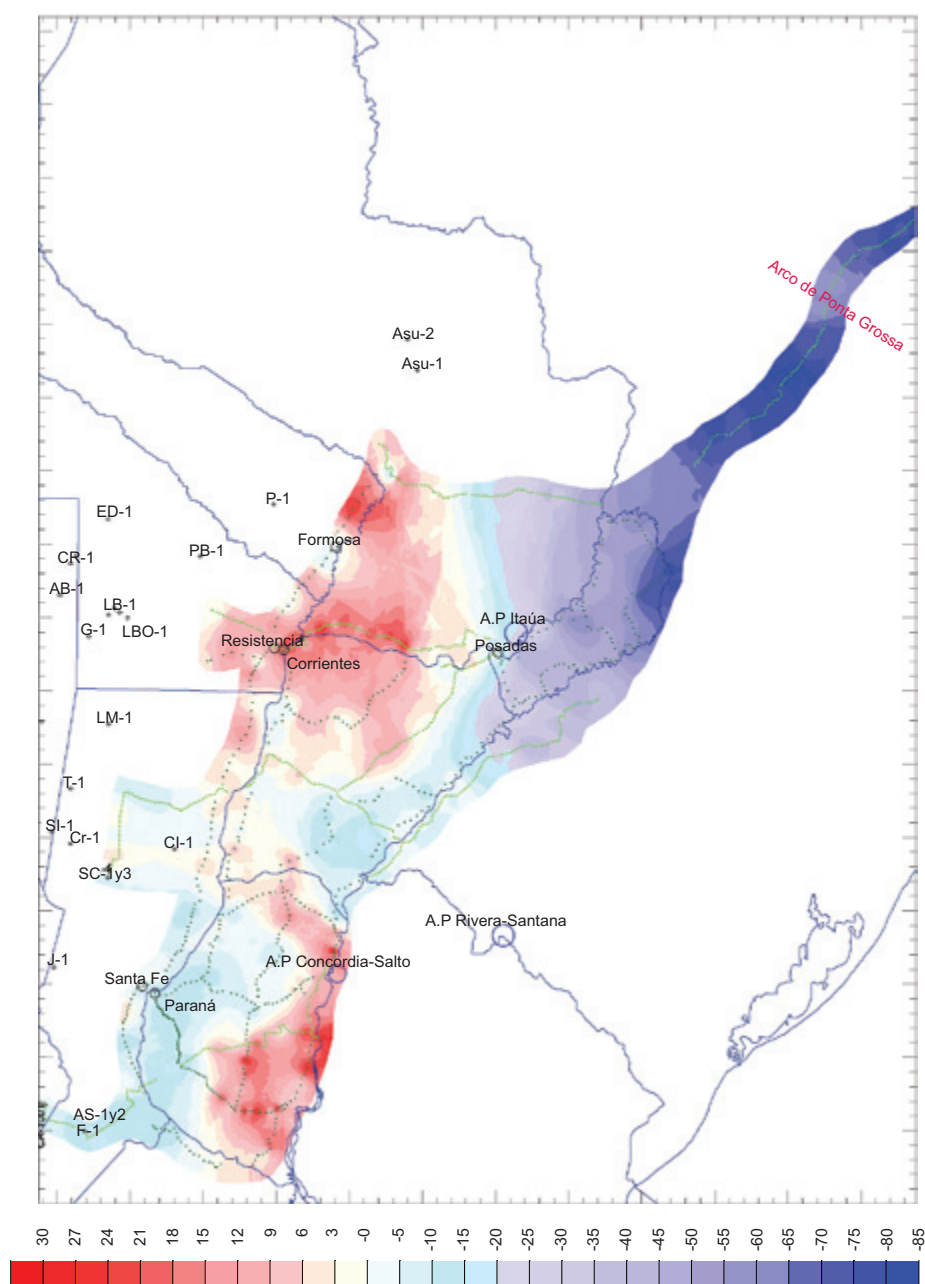


Figura 13.-
Localização dos poços no setor argentino e geofísica.

Figura 13.-
Ubicación de los pozos en el sector argentino y geofísica.

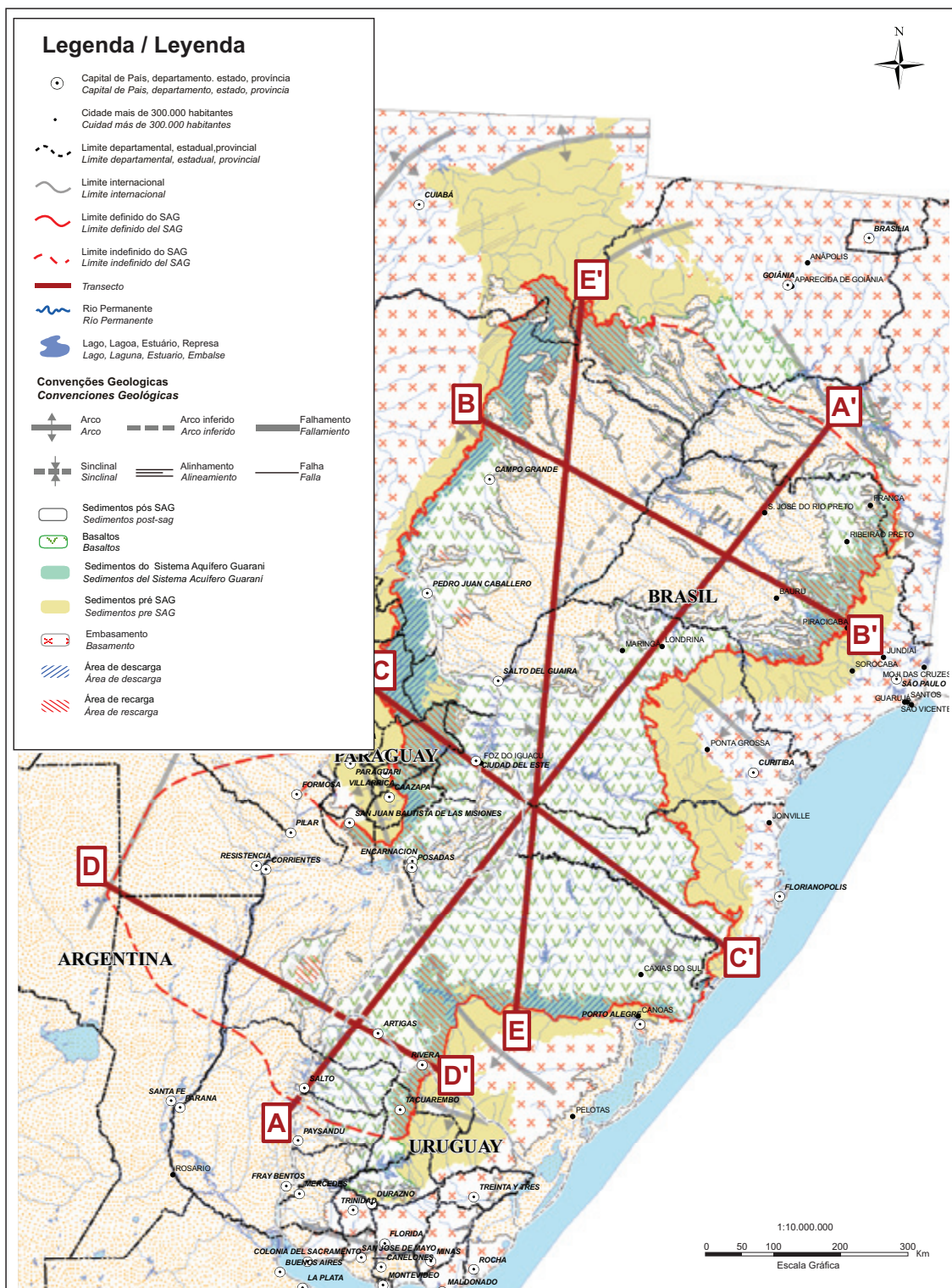


Figura 14.-
Localização das seções esquemáticas.

Figura 14.-
Ubicación de los cortes.

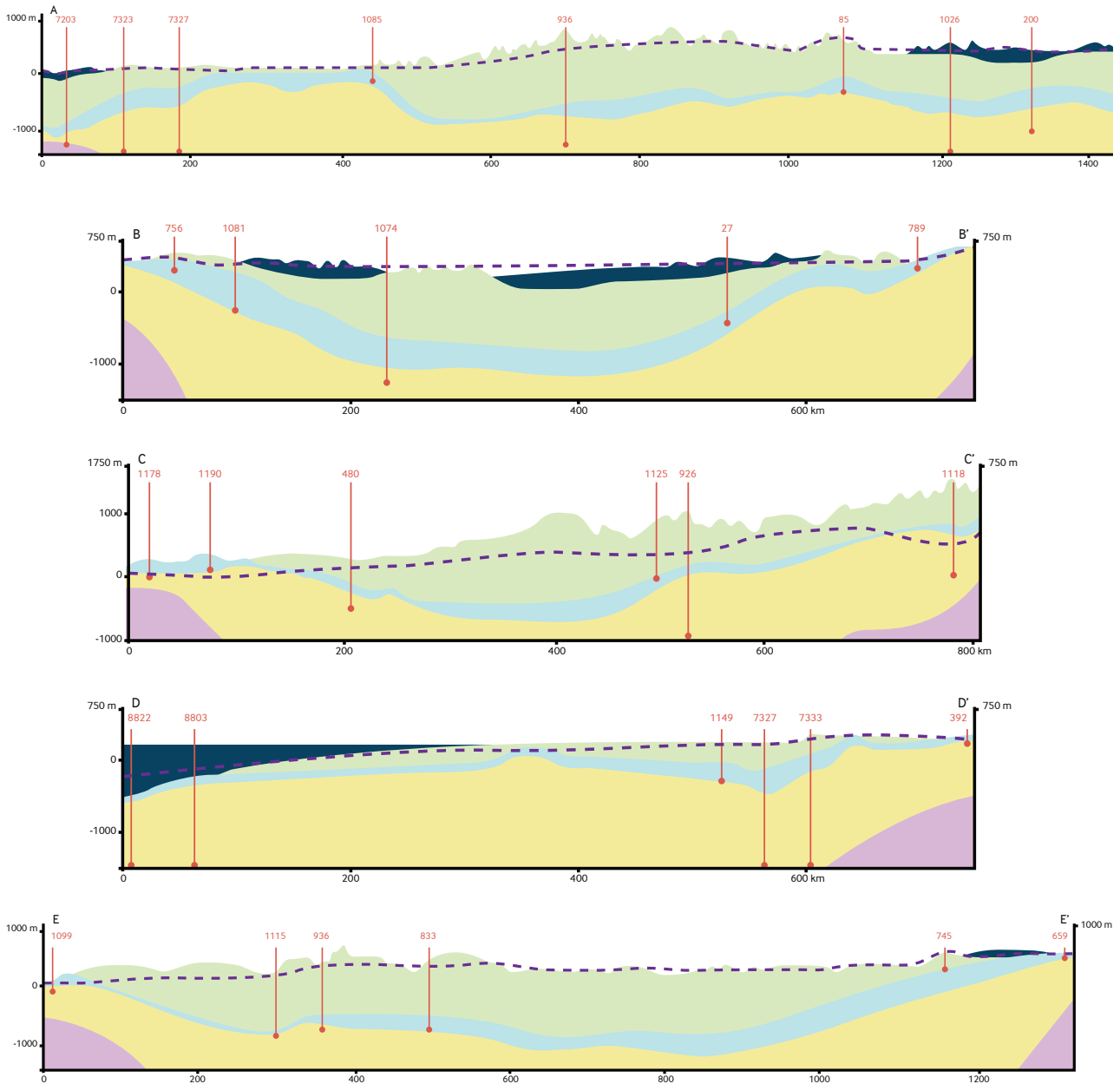


Figura 15.-

(A, B, C, D, E): Seções esquemáticas.

Em função da associação existente entre os basaltos da Formação Serra Geral e os arenitos da porção superior do SAG, o limite de ocorrência dos derrames basálticos sobre os sedimentos recentes depositados na Bacia Chacoparanaense – ainda que se desconheça

Figura 15.-

(A, B, C, D, E): Cortes esquemáticos.

En función de la asociación existente entre los basaltos de la Formación Serra Geral y las areniscas de la porción superior del SAG, el límite de ocurrencia de los derrames basálticos sobre los sedimentos recientes depositados en el ámbito de la cuenca Chacoparanaense, -aunque se desconozca

a natureza das unidades que estão por cima – constitui um critério exploratório utilizado na definição de seu limite.

Em geral, vários elementos estão envolvidos na definição dos limites do aquífero. Esses limites podem ser estruturais (os sedimentos desaparecem abruptamente por causa de falhas e por outros motivos), como na região do Alto Las Breñas-Otumpa, nas províncias de Chaco e Santiago del Estero, ou estratigráficos (os sedimentos desaparecem gradualmente), como no norte do SAG, nos Estados de Goiás e Minas Gerais.

Climatología

Os principais aspectos climáticos do sudeste da América do Sul ajudam a explicar o ciclo anual de precipitação. Ao norte da latitude 40° S, a circulação próxima da superfície é dominada por zonas de altas pressões quase estacionais do Pacífico e do Atlântico Sul. Na maior parte do tempo, há uma zona de baixa pressão no noroeste da Argentina e no Sul da Bolívia, causada pela interação entre os ventos do oeste (Andes) e a superfície aquecida (LICHTENSTEIN, 1982). Essa baixa pressão acentua-se antes da passagem das frentes frias e desaparece um ou dois dias depois. É um sistema quente, menos intenso no inverno, que afeta apenas a baixa troposfera (até 700 hPa) e que costuma vir acompanhado por subsidência e, conseqüentemente, ausência de nebulosidade.

A leste dos Andes há apenas duas fontes de vapor de água: o Oceano Atlântico e a floresta tropical sul-americana. Isso tem um efeito importante sobre o ciclo anual de precipitação. No inverno, quando a alta pressão do Atlântico Sul penetra sobre o continente, há um deslocamento de umidade para o Sul, mais intenso nas proximidades da longitude 60° W. Esse deslocamento origina-se no fluxo do leste, proveniente do Oceano Atlântico e está associado com uma região de máxima precipitação em seu curso, na parte sul da Bacia do Prata. No entanto, a oeste da longitude 60° W, a precipitação é escassa. No verão, o norte da bacia é ocupado pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Foram utilizados dados de 176 estações da região, que contam com registros completos de precipitação durante um período de trinta anos (1968-1997). O

la naturaleza de las unidades que están por encima constituye un criterio exploratorio utilizado en la definición de su límite.

En general, variados elementos son involucrados en la definición de los límites del acuífero, que son caracterizados como estructurales (los sedimentos se “terminan” abruptamente por la presencia de alguna falla, etc.), como por ejemplo en la región del Alto Las Breñas-Otumpa, en las provincias del Chaco y Santiago del Estero, o estratigráficos (los sedimentos se “terminan” gradualmente, se va “afinando” la capa sedimentaria hasta desaparecer) como por ejemplo al norte de la región que abarca el SAG (Goiás y Minas Gerais).

Climatología

Los principales aspectos climáticos del sudeste de América del Sur, ayudan a explicar el ciclo anual de la precipitación. Al norte de 40°S, la circulación próxima a la superficie es dominada por los centros de altas presiones casi estacionarios del Pacífico y el Atlántico Sur. En la mayor parte del tiempo hay un centro de baja presión en el noroeste de Argentina y sur de Bolivia, originada en la interacción entre los Andes, vientos del oeste en altos niveles y el calentamiento de la superficie (Lichtenstein, 1982). Esta baja se profundiza antes del pasaje de los frentes fríos y desaparece uno o dos días después. Es un sistema caliente, menos intenso en el invierno que afecta sólo a la baja troposfera (hasta 700 hPa) y frecuentemente está acompañado por subsidencia y conseqüentemente ausencia de nubosidad.

Al este de los Andes, hay solamente dos fuentes posibles de vapor de agua en el sudeste de América del Sur: el Océano Atlántico y la floresta tropical sudamericana. Esto tiene un efecto importante sobre el ciclo anual de la precipitación. En el invierno, cuando la alta presión del Atlántico Sur penetra sobre el continente, hay un transporte de humedad para el sur más intenso en torno de 60°W, que se origina en el flujo del este proveniente del Océano Atlántico y está asociado con una región de máxima precipitación en su curso, en la parte sur de la Cuenca del Plata. Por otro lado, al oeste de 60°W, la precipitación es escasa en la región que en el verano está ocupada por la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) en el norte de la cuenca.

Se utilizaron datos de 176 estaciones de la región que contaron con registros completos de precipitación durante un período de 30 años (1968-

ciclo anual médio e a precipitação média anual foram calculados para cada uma delas. O campo de chuva anual acumulada de forma média no período de 1968 a 1997 mostra um gradiente de precipitação em direção à Costa do Atlântico (figura 16). Evidenciam-se duas zonas de máximos. A primeira compreendida entre os meridianos 48° e 56°, ao norte do paralelo 24° S, onde a precipitação é superior a 1.300 mm por ano. A segunda encontra-se na zona Sul do Brasil, em Misiones e no Leste do Paraguai. Nessa região, a média anual de chuvas supera os 1.600 mm. A quantidade de precipitação anual decresce em direção ao oeste e à região sudeste sobre o Uruguai.

1997). El ciclo anual promedio y la precipitación media anual fueron calculados para cada una de ellas. El campo de lluvia anual acumulada en forma media durante 1968-1997 muestra un gradiente de precipitación hacia la costa del Atlántico (Figura 16). Se evidencian 2 zonas de máximos: la primera comprendida entre 48° y 56°O, al norte de 24°S donde la precipitación asciende por encima de los 1300 mm anuales y un segundo núcleo, más importante en la zona sur de Brasil, Misiones y este de Paraguay. En esta región la lluvia anual supera los 1600 mm. La cantidad de precipitación anual decrece hacia el oeste y también hacia el sudeste, sobre Uruguay.

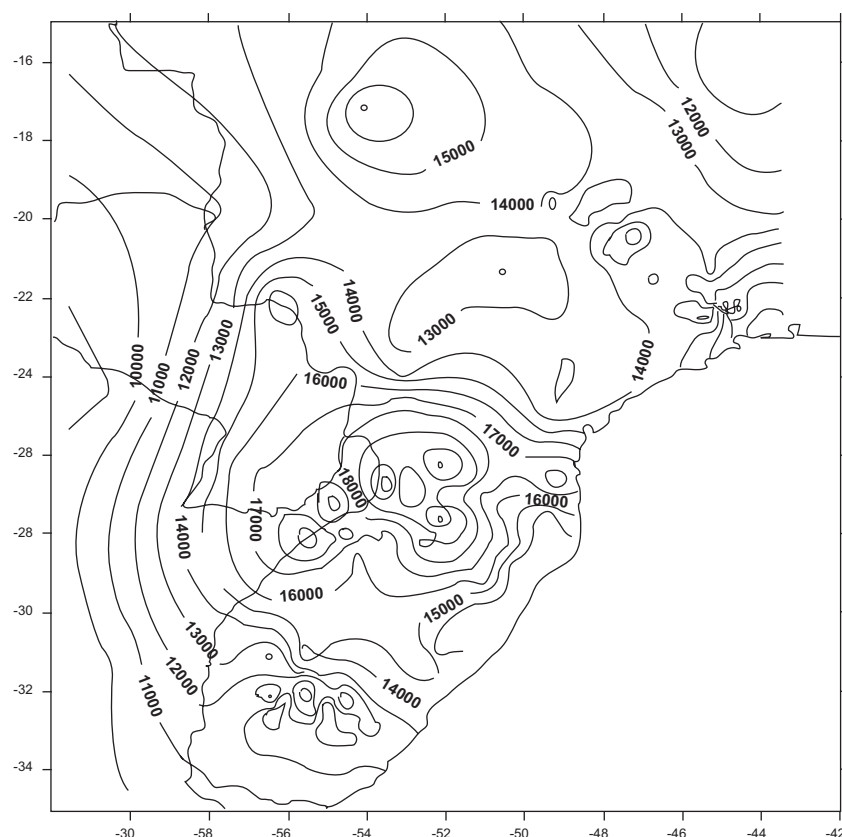


Figura 16.-

Precipitação anual acumulada (em décimos de mm). Média no período 1968-1997.

A evolução temporal do campo espacial de precipitação mostra que a configuração do verão (dezembro, janeiro e fevereiro) caracteriza-se por

Figura 16.-

Precipitación anual acumulada (en décimas de mm), promedio en el período 1968-1997.

La evolución temporal del campo espacial de precipitación muestra que la configuración de verano (diciembre, enero, febrero) está caracterizada por

níveis máximos de chuvas ao norte do aquífero, com valores superiores a 200 mm por mês. Além disso, máximos relativos são observados na zona de fronteira entre o Paraguai, o Brasil e a Argentina (Mesopotâmia), com valores não tão altos, mas significativamente importantes (entre 160 e 180 mm). Essa configuração modifica-se à medida que chega o inverno. Nessa época, predomina a presença de um único máximo no sudeste do sistema, com valores superiores a 120 mm por mês, desde maio até outubro, englobando a zona Sul do Brasil, a Mesopotâmia Argentina, o Paraguai e o Uruguai.

Com relação às tendências de precipitação anual observadas, foram estudados os dados de 42 estações para observar as variações seculares da chuva acumulada anualmente. Essas estações contavam com registros completos realizados entre os anos de 1946 e 1997. Foram elaboradas as séries de chuva anual para cada uma delas.

De forma geral, o Sul do Brasil e o Leste da Mesopotâmia Argentina são zonas com tendências positivas significativas, assim como a região entre o norte de São Paulo e Campo Grande (aproximadamente entre 19° e 22° S e 49° e 45° W). Ambas as zonas correspondem à área central de descarga do aquífero. Entretanto, em direção ao nordeste, fora da área do Aquífero Guaraní, observa-se um núcleo de tendências negativas de precipitação localizado em 18° S e 40° W aproximadamente.

As temperaturas mais elevadas ocorrem na zona noroeste do aquífero, durante os meses de verão. O gradiente noroeste-sudeste mantém-se durante todo o ano. Observa-se também uma sistemática diminuição da temperatura em direção ao Atlântico. Em dezembro, janeiro e fevereiro as temperaturas alcançam os 25 °C e diminuem na direção sudeste, onde, nessa época, a média é de 22-23 °C. No verão, a zona norte do aquífero apresenta uma evidente diminuição de temperatura de oeste para leste, o que evidencia o efeito monçônico que torna o interior, no território continental, mais quente que o território costeiro. Nos meses de junho, julho e agosto, a temperatura média varia entre 10° no sul e 19° no norte e se visualiza um gradiente meridional que se manifesta na diferença entre a temperatura da região norte e da região sul.

máximas lluvias al norte del acuífero con valores por encima de los 200 mm mensuales. Además máximos relativos se observan en la zona limítrofe entre Paraguay, Brasil y Argentina (Mesopotamia), con valores no tan altos pero significativamente importantes (entre 160 y 180 mm). Esta configuración se modifica hacia el invierno, donde domina la presencia de un único máximo en el sudeste del sistema, con valores superiores a los 120 mm mensuales desde mayo hasta octubre, abarcando la zona sur de Brasil, Mesopotamia Argentina, Paraguay y Uruguay.

Con respecto a las tendencias observadas de precipitación anual, se consideró para las variaciones seculares de la lluvia acumulada anualmente, un conjunto de 42 estaciones que tuvieron registros completos entre 1946 y 1997. Se elaboraron las series de lluvia anual para cada una de ellas.

En general, resulta una zona con tendencias positivas significativas en el sur de Brasil y este mesopotámico y otra al norte de San Pablo hasta la zona de Campo Grande (aproximadamente entre 19° y 22°S y 49° y 45°O). Ambas zonas corresponden al área central de descarga del acuífero. Sin embargo, hacia el noreste, afuera del área abarcada por el Guaraní se observa un núcleo de tendencias negativas de precipitación centrado aproximadamente en 18°S y 40°O.

A su vez para considerar los regímenes de temperatura, se utilizaron datos de 181 estaciones de la región que contaron con registros completos durante un período de 30 años (1968-1997). La evolución de la temperatura media mensual fue calculada para cada una de ellas.

Las temperaturas más altas se producen en la zona noroeste del acuífero durante los meses de verano. El gradiente noroeste-sudeste se mantiene durante todo el año y también se observa sistemáticamente una disminución de temperatura hacia el Atlántico. En diciembre, enero y febrero alcanzan los 25°C y disminuye hacia el sudeste donde para esta época la temperatura media alcanza los 22-23°C. En verano la zona norte del acuífero presenta una marcada disminución de temperatura desde el oeste hacia el este, evidenciando el efecto monzónico por el cual el territorio muy continental adquiere temperaturas bastante más elevadas que las regiones costeras. En junio, julio y agosto la temperatura media varía entre los 10°C en el sur y 19°C en el norte y se

Durante as estações de transição, as temperaturas são intermediárias. Observa-se uma característica distintiva do outono: a massa de ar quente, que vem do norte e vai para o sudeste, concentrando-se em 20° S e 50° W, evidencia o deslocamento da zona de convergência intertropical. Essa característica pode ser observada também durante a primavera e é especialmente visível em outubro e novembro, quando a convecção desloca-se para o sul, dando início à estação chuvosa.

Em resumo, há três zonas com tendências negativas de temperatura. A primeira engloba o Uruguai e o Sul do Brasil, com valores que oscilam entre 0,3° e 3 °C a cada 100 anos. A segunda corresponde à zona central do Brasil, na latitude 20° S, entre os meridianos 46° e 52° W. A terceira está no Sul do Paraguai, onde a variação é de 2° a 4 °C a cada 100 anos. Nos outros lugares, a tendência é de temperaturas mais altas. No norte e no leste do Aquífero e na Costa Atlântica, as mudanças variam entre 1,6° e 3,7 °C a cada 100 anos. Na região argentina do aquífero, as mudanças são mais leves, entre 0,4° e 1,5° a cada 100 anos.

Com relação ao balanço hídrico atmosférico, o conhecimento da evaporação potencial de um lugar (que contém registros de precipitação) permite calcular o balanço hídrico anual. Dessa forma é possível conhecer a quantidade de água que realmente evapora do solo e da transpiração das plantas em determinado lugar. Além disso, é possível conhecer a quantidade de água armazenada no solo e aquela que se perde por escoamento superficial e profundo. A metodologia usada nesse estudo baseia-se em valores médios mensais de temperatura e de precipitação acumulada e na aplicação da técnica de Thornthwaite e Matter (1955).

A figura 17 mostra os valores de *deficits* (linha vermelha) e excessos hídricos (linha verde) anuais médios durante o período 1981-1990. Pode-se observar uma tendência a excessos em toda a zona do aquífero, fundamentalmente na zona Sul do Brasil e no Uruguai. Um importante gradiente pode ser observado na direção noroeste da área de estudo, onde se registram *deficits* de cerca de 300 mm.

visualiza un gradiente meridional que se manifiesta en la diferencia entre la temperatura de la región norte y de la sur.

Durante las estaciones de transición las temperaturas son intermedias entre las de verano y las de invierno. Se observa un rasgo distintivo en el otoño: la lengua cálida que se introduce desde el norte en dirección sudeste, centrada en 20°S, 52°O y que pone de manifiesto el desplazamiento de la convergencia intertropical. Este rasgo se observa también durante la primavera y es especialmente visible en octubre y noviembre cuando la convección se desplaza hacia el sur dando lugar al comienzo de la estación lluviosa.

En resumen pueden observarse 3 zonas con tendencias negativas de temperatura. La primera abarca Uruguay y sur de Brasil, con valores que oscilan entre 0,3° y 3°C cada 100 años, la segunda corresponde a la zona de Brasil Central, en 20°S y entre 46 y 52°O y la tercera en el sur de Paraguay, variando entre 2 y 4° cada 100 años. En el resto se evidencian tendencias hacia temperaturas más altas. En el norte y este del acuífero y sobre la costa Atlántica los cambios variaron entre 1,6° y 3,7° cada 100 años. En la región Argentina del acuífero los cambios resultaron más leves, entre 0.4° y 1.5°C cada 100 años.

Con relación al balance hídrico rama atmosférica, el conocimiento de la evaporación potencial de un lugar, del que se tienen registros de precipitación, permite establecer su balance hídrico anual. En esta forma es posible conocer la cantidad de agua que realmente se evapora desde el suelo y transpiran las plantas en ese lugar, la cantidad de agua almacenada por el suelo y la que se pierde por derrame superficial y profundo. La metodología utilizada en este estudio se basa en valores medios mensuales de temperatura y de precipitación acumulada y la aplicación de la técnica de Thornthwaite y Matter (1955).

*La figura 17 muestra los valores de *déficits* (línea roja) y excesos (línea verde) anuales medios durante el período 1981-1990. Puede observarse una tendencia a los excesos en toda la zona del acuífero, fundamentalmente en la zona sur de Brasil y de Uruguay. Un gradiente importante se observa hacia la zona noroeste del área de estudio donde se registran *déficits* del orden de los 300 mm.*

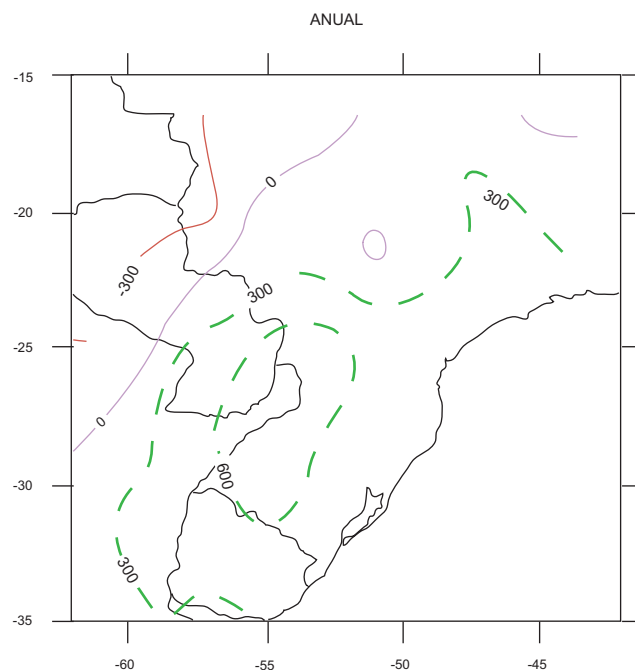


Figura 17.-

Deficits (linha vermelha) e excessos hídricos (linha verde pontilhada) anuais médios durante o período 1981-1990.

Cenário climático futuro

De acordo com os resultados de estudos regionais, para escalas mais finas, as mudanças simuladas pelos modelos regionais podem ser substancialmente diferentes em magnitude e sinal se comparados aos resultados obtidos pelos Modelos Atmosféricos de Circulação Geral de baixa resolução. Isso faz com que seja necessário determinar cenários de mudanças climáticas recorrendo a modelos regionais de alta resolução em vez de tentar chegar a conclusões locais a partir de cenários gerados por modelos globais pouco representativos dos climas regionais.

Os cenários A2 e B2 previstos são definidos da seguinte forma:

- A2: prevê um mundo heterogêneo, com a preservação das identidades locais, com alta taxa de crescimento populacional e desenvolvimento econômico regional menor que em outras previsões.
- B2: prevê um mundo que enfatiza soluções locais, com aumento contínuo da população menor que no cenário A2 e níveis intermediários de desenvolvimento econômico.

Figura 17.-

Déficits (línea roja llena) y excesos (línea verde cortada) anuales medios durante el período 1981-1990.

Escenario climático futuro

De acuerdo a los resultados de estudios regionales, para escalas más finas los cambios simulados por los modelos regionales pueden ser sustancialmente diferentes en magnitud o signo respecto de los obtenidos con los Modelos Atmosféricos de Circulación General de baja resolución. Esto hace necesario la determinación de escenarios de cambio climático recurriendo al uso de modelos regionales de alta resolución en lugar de intentar conclusiones locales a partir de escenarios generados por modelos globales poco representativos de los climas regionales.

Los escenarios llamados A2 y B2 son definidos como sigue:

- A2: Supone un mundo heterogéneo, la preservación de las identidades locales, una alta tasa de crecimiento poblacional, un desarrollo económico regional, menor que en otras líneas narrativas.
- B2: Supone un mundo con énfasis en las soluciones locales, un aumento continuo de la población (menor que en A2) y niveles intermedios de desarrollo económico.

Nuñez et al. (2006-2008) estimaram cenários climáticos para a década de 2081-2090, mediante experimentos numéricos e utilizando o modelo climático regional MCR-CIMA com uma resolução média de 50 km. Os cenários foram gerados para os cenários de emissão SRES IPCC A2 e B2. O cenário A2 é o mais crítico. O B2 é o mais moderado. Os experimentos geraram valores médios anuais, sazonais, mensais e diários para diversas variáveis.

Temperaturas

Em termos gerais, a previsão do cenário A2 é que a temperatura média global aumente 3 °C até 2080. O cenário B2 prevê um aumento de 2.3 °C. Com relação à Argentina, as temperaturas tenderão a ser mais altas principalmente no inverno e na primavera (figura 18), com variação superior a 5 °C na região de estudo, com aumento simultâneo das temperaturas máximas e mínimas.

Precipitações

A precipitação aumentará principalmente em outubro na região de estudo (figura 19). Mantêm-se as tendências positivas atuais de precipitação.

Nuñez y colaboradores (2006, 2008) generaron escenarios climáticos para la década 2081-2090, mediante experimentos numéricos, utilizando el modelo climático regional MCR-CIMA con una resolución media de 50 km. Los escenarios fueron generados para los escenarios de emisión SRES IPCC A2 y B2. El escenario A2 es el más crítico, siendo el B2 más moderado. Los experimentos generaron valores medios anuales, estacionales, mensuales y diarios para las distintas variables.

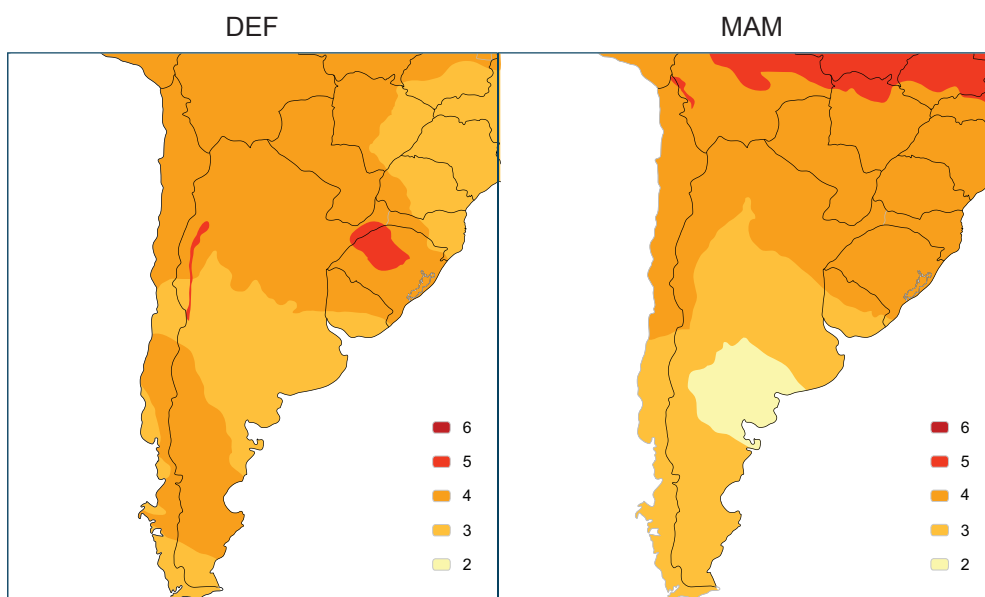
Temperaturas

En términos generales se observa hacia 2080 un aumento de temperatura media global de 3°C para el escenario A2 y aproximadamente 2.3°C en la situación B2. Con respecto a Argentina las temperaturas tenderán a ser más altas sobre todo en invierno y primavera (Figura 18) con valores que exceden los 5°C en la región de estudio, con aumento simultáneo de las temperaturas máximas y mínimas.

Precipitaciones

La precipitación por su lado, aumentará principalmente en otoño en la región de estudio (Figura 19). Se mantienen (proyecciones) las tendencias positivas actuales de precipitación.

MM5 Temperatura média A2
MM5 Temperatura media A2



Continua.-

Continua.-

Continuação.-

Continuación.-

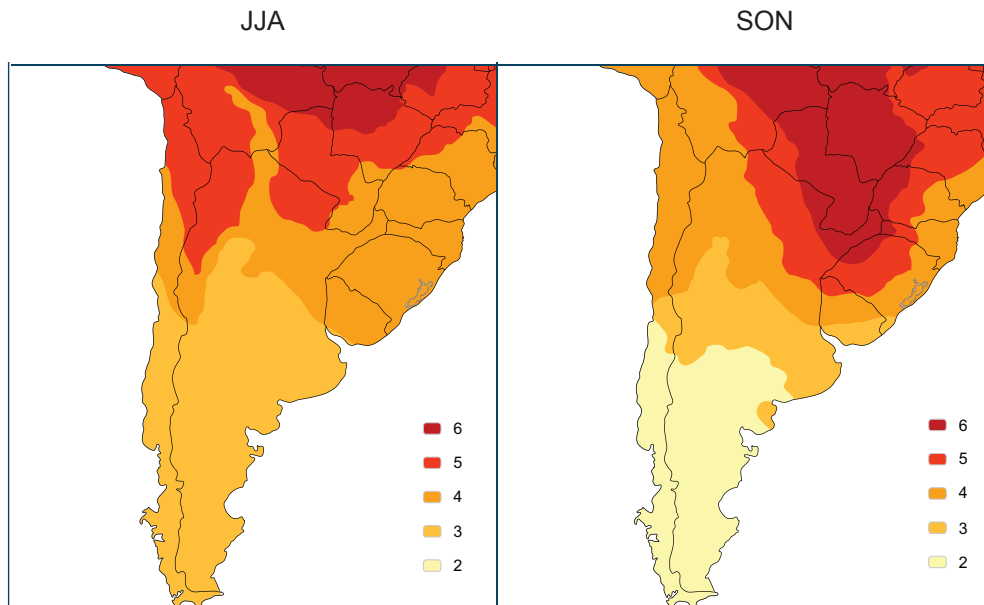
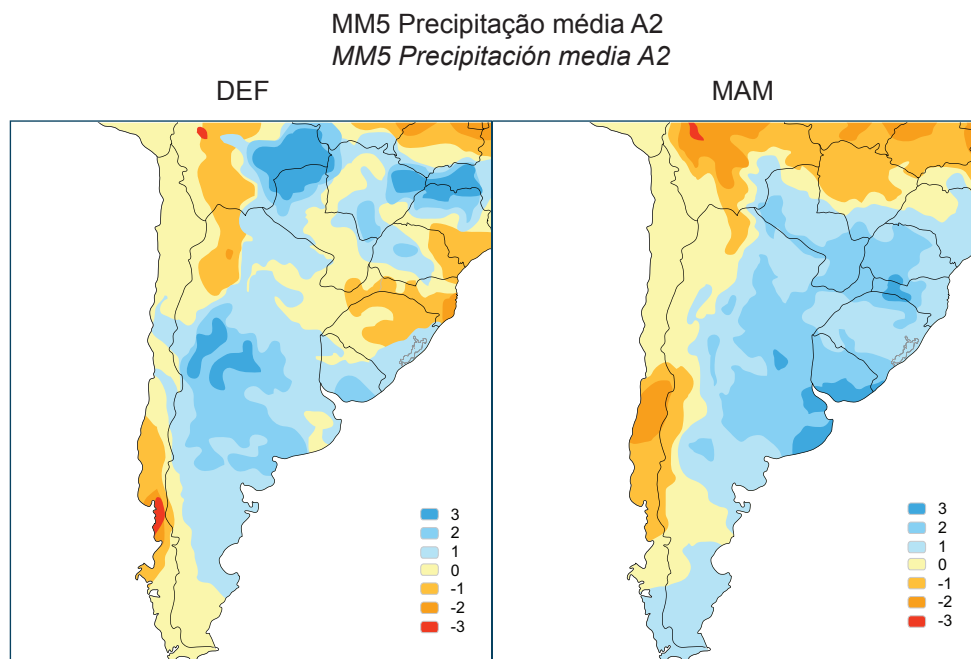


Figura 18.-
Cenários de mudanças de temperatura até o final do século. O cenário de emissões é o SRES IPCC A2 e as mudanças em °C. Verão (DEF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON).

Figura 18.-
Escenarios de cambios en temperatura para fines de la presente centuria. El escenario de emisiones es el SRES IPCC A2 y los cambios en °C. Verano (DEF), Otoño (MAM), Invierno (JJA) y Primavera (SON).



Continua.-

Continua.-

Continuação.-

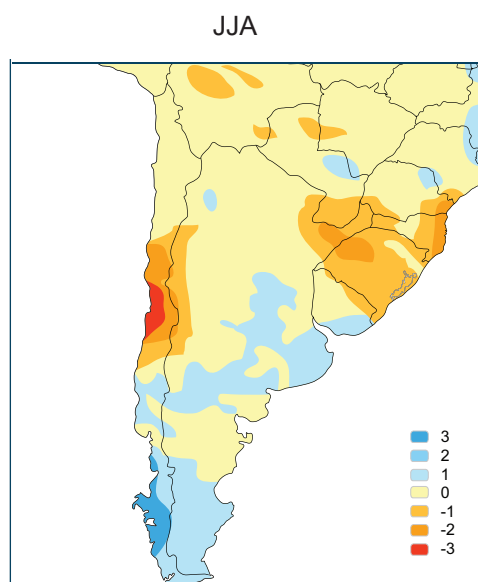


Figura 19.-

Cenários de mudanças na precipitação até o fim do século. O cenário de emissões é o SRES IPCC A2 e as mudanças expressadas em mm/dia. Verão (DEF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON).

Deficits e excessos

Os principais aspectos climáticos de interesse para a região podem ser resumidos da seguinte forma:

A disponibilidade de água no solo diminuirá substancialmente na zona noroeste do aquífero, onde os *deficits* estão aumentando claramente, sobretudo no cenário A2. As principais áreas afetadas serão as que se encontram em território paraguaio e brasileiro entre os paralelos 15° e 20° S e os meridianos 49° e 57° W. Essa região do Brasil, que na climatologia atual é representada pelo modelo MM5, apresenta valores de excessos de aproximadamente 300 mm anuais. Os dois cenários de emissões futuras (A2 e B2) preveem *deficits* entre 300 e 1.000 mm.

O extremo oeste da zona de estudo, entre os paralelos 23° e 30° S, na Argentina, registra *deficits* na ordem de 300 mm anuais na climatologia atual modelada com o modelo MM5. Entretanto, os cenários futuros projetam um deslocamento da isolinha 0 para o leste

Continuación.-

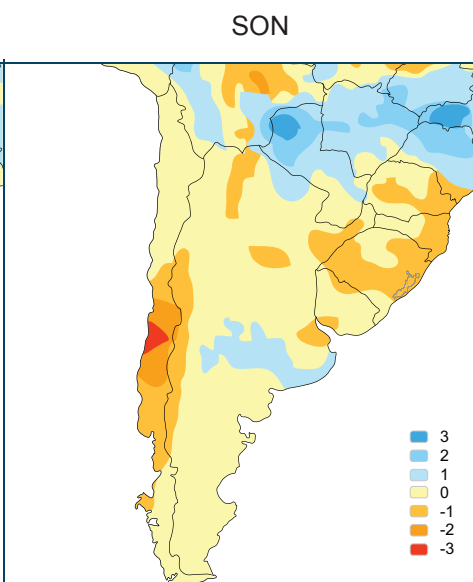


Figura 19.-

Escenarios de cambios en precipitación para fines de la presente centuria. El escenario de emisiones es el SRES IPCC A2 y los cambios expresados en mm/día. Verano (DEF), Otoño (MAM), Invierno (JJA) y Primavera (SON).

Déficits y excesos

Finalmente, los principales aspectos climáticos de interés para la región se pueden resumir de la siguiente manera:

La disponibilidad de agua en el suelo anualmente se verá sustancialmente disminuida en la zona nor-occidental del acuífero, donde los *deficits* se incrementan marcadamente, especialmente en el escenario A2. Se verá afectada especialmente la zona del territorio paraguayo y de Brasil entre 15° y 20° S y entre 49° y 57° O. Esta zona de Brasil que en la climatología actual representada por el modelo MM5 presenta valores de excesos del orden de los 300 mm anuales, proyecta *deficits* en ambos escenarios de emisiones futuros (A2 y B2), que varían entre 300 y más de 1000 mm.

El extremo oeste de la zona de estudio, entre 23° y 30°S en Argentina, registra *deficits* del orden de 300 mm anuales en la climatología actual modelada con el modelo MM5. Sin embargo los escenarios futuros proyectan un corrimiento de la isolínea de 0 hacia el

muito mais amplo no caso do cenário A2, em que os *deficits* superam os 900 mm anuais. No caso do cenário B2, o deslocamento é menor, assim como a intensidade do *deficit* previsto.

Com relação à zona de excessos da climatologia do modelo MM5, que engloba o Sul do Brasil, o Leste do Paraguai, o Uruguai e toda a porção argentina, salvo o extremo oeste mencionado no item anterior, ambos os cenários preveem sua diminuição. O cenário A2 prevê uma diminuição mais acentuada na zona nordeste da área de estudo. No caso do cenário B2, os excessos são maiores (aproximadamente 900 mm anuais) na área brasileira localizada em 27° S 52° W. Também se observa maior excesso no Uruguai no caso do cenário B2.

A diminuição da disponibilidade de água ocorrerá em todas as estações do ano, contudo será mais acentuada na primavera e no verão. No caso do verão, principalmente no cenário A2, todo o aquífero apresentará menor disponibilidade de água, com uma diminuição acentuada da área de excesso.

No caso do inverno, não foram previstas grandes mudanças ao comparar a climatologia atual modelada com o MM5 e os possíveis cenários futuros. A zona norte da área de estudo parece ter maiores *deficits*, e a zona do Uruguai apresenta os maiores excessos localizados no caso do cenário B2.

O outono apresenta mudanças evidentes. A atual climatologia modelada com MM5 apresenta excessos em toda a região, exceto no noroeste. Entretanto, ambos cenários futuros mostram que a zona de excessos diminuirá substancialmente. Ela se limitará à região entre os 26° e 28° S no caso do cenário A2 e se limitará ao Sul do Brasil, ao Uruguai e à região do Rio da Prata no cenário B2.

No caso da primavera, pela atual climatologia, a área de excessos, localizada no sudeste, diminuirá nos cenários futuros. Mas a característica mais importante é o aumento na intensidade dos *deficits* no norte, que mudam de 200 mm a valores muito mais altos (880 mm no A2 e 600 mm no B2) na porção noroeste.

Com relação à zona sudeste do aquífero, caracterizada por excessos hídricos anuais, não

este, mucho más profundo en el caso del escenario A2 donde los déficits superan los 900 mm anuales. En el caso del escenario B2 el corrimiento es menor y también lo es la intensidad del déficit pronosticado.

La zona de excesos que se muestra en la climatología del modelo MM5 abarca el sur de Brasil, este de Paraguay, Uruguay y casi toda la región Argentina, salvo el extremo oeste señalado en el ítem anterior. En ambos escenarios futuros esta zona se ve muy disminuida en extensión sobre todo en la zona noreste del área de estudio y especialmente en el escenario A2. En el caso particular del escenario B2, los excesos son marcadamente mayores (del orden de 900 mm anuales) en el área brasileña centrada en 27° S 52° O. También se observa un mayor exceso en Uruguay en el caso del escenario B2.

Esta disminución de agua disponible se presenta en todas las estaciones del año, aunque los déficits son visiblemente más importantes en primavera y verano. En el caso de verano, sobre todo en el escenario A2, todo el acuífero presenta menor disponibilidad de agua y el área de exceso se reduce notoriamente.

En el caso de la estación invernal, no se detectan demasiados cambios cuando se compara la climatología actual modelada con el MM5 y los posibles escenarios futuros. La zona norte del área de estudio parece tener mayores déficits y la zona de Uruguay presenta mayores excesos localizados en el caso del escenario B2.

El otoño muestra también cambios muy marcados. La climatología actual modelada con MM5 presenta excesos en toda la región excepto en el noroeste. Sin embargo ambos escenarios futuros muestran que la zona de excesos queda reducida sustancialmente: sólo se observan en Brasil entre 26 y 28° S en el caso del escenario A2 y marcadamente menos se observa en el sur de Brasil, Uruguay y zona del Río de la Plata en el escenario B2.

En el caso de la primavera el área de excesos ubicada en el sudeste en la climatología actual se ve ligeramente disminuida en los escenarios futuros. Pero el rasgo más importante es el aumento en la intensidad de los déficits en el norte que cambian desde 200 mm a valores mucho más altos (880 mm en A2 y 600 mm en B2) en la porción noroeste.

Con respecto a la zona sudeste del acuífero, caracterizada por excesos hídricos anuales, no

parece existir tendência a grandes mudanças. Só se observa uma leve diminuição dos excessos sobretudo no cenário A2. As maiores mudanças ocorrem na região costeira de Buenos Aires e no Rio da Prata. Mesmo com os aumentos de precipitação previstos, o balanço de água na atmosfera dependerá também das mudanças de temperatura que, para a região do aquífero, são consideráveis. Pode haver erros nesses dados por causa de efeitos de limites.

A redução dos excessos no sudeste do aquífero ocorre em todas as estações nos dois cenários, salvo no inverno. O cenário A2 é o que prevê as reduções de excessos mais acentuadas nessa área.

Hidrologia

Foram avaliadas as disponibilidades hídricas mediante o balanço hidrológico mensal contínuo. O cálculo desse tipo de balanço hidrológico oferece uma boa descrição do comportamento do ano hidrológico mediante a estimativa do estado de reserva a cada intervalo de tempo considerado.

Os balanços hídricos foram realizados em 17 estações localizadas nas bacias escolhidas de forma que a análise correspondesse aos pontos de medição das vazões.

A desagregação das áreas afluentes da Bacia do Rio da Prata (figura 20), no setor que compreende o SAG, foi realizada de acordo com os fechamentos hidrológicos com informação disponível sobre vazão no período coincidente com o do balanço hídrico (1968-1997). Isso corresponde, basicamente, à Bacia dos Rios Paraná e Uruguai.

Na Bacia do Rio Paraná foram consideradas quatro bacias afluentes da margem esquerda: Rio Grande, Rio Tietê, Rio Paranapanema e Rio Iguaçu. As bacias afluentes da margem direita não possuem dados disponíveis sobre vazão. Por isso, sua contribuição foi estimada matematicamente a partir de informação das diversas seções do curso principal do Rio Paraná e dos afluentes da margem esquerda.

Na Bacia do Rio Paraguai, cujas contribuições superficiais estão praticamente fora da área do SAG, considerou-se a seção de Puerto Bermejo, próximo a sua foz no Rio Paraná, em Corrientes.

parece existir tendencia hacia mayores cambios. Sólo se observa una leve disminución de los excesos sobre todo en el escenario A2. Los mayores cambios se producen en la región costera bonaerense y en el Río de la Plata. Tómese en consideración de que si bien se proyectan aumentos de precipitación, el balance de agua en la atmósfera dependerá también de los cambios de temperatura que, para la región del acuífero, son considerables. Cabe aclarar posibles errores por efectos de bordes.

La reducción de los excesos en el sudeste del acuífero se produce en todas las estaciones, salvo en el invierno en ambos escenarios. El escenario A2 es el que produce las reducciones de excesos más importantes en esa área.

Hidrologia

Se evaluaron las disponibilidades hídricas mediante el balance hidrológico a paso mensual continuo. El cálculo de este tipo de balance hidrológico ofrece una buena descripción del comportamiento del año hidrológico mediante la estimación del estado de las reservas a cada intervalo de tiempo considerado.

Los balances hídricos se realizaron en 17 estaciones distribuidas arealmente en las cuencas escogidas a efectos de permitir efectuar un cierre coincidente con los puntos de medición de caudales.

La desagregación de las áreas de aporte a la Cuenca del río de la Plata (Figura 20), en el sector que comprende el SAG, se realizó teniendo en cuenta los cierres hidrológicos en que se cuenta con información de caudales en el periodo coincidente con el de balance hídrico (1968-1997) que básicamente corresponde a la cuenca de los ríos Paraná y Uruguay.

En la cuenca del río Paraná se consideraron cuatro cuencas de aporte sobre margen izquierda: ríos Grande, Tieté, Paranapanema e Iguazú. En las cuencas de aporte de margen derecha no se dispone de información de caudales, por lo que dichos aportes fueron determinados por diferencias a partir de la información en las distintas secciones del curso principal del río Paraná y los afluentes de margen izquierda.

En la cuenca del río Paraguay, cuyos aportes superficiales están –prácticamente–, fuera del área del SAG, se consideró la sección de Pto. Bermejo próximo a su desembocadura en el río Paraná en Corrientes.

A Bacia do Rio Uruguai foi desagregada em três trechos: Caxambu (Brasil), Paso de los Libres (Argentina-Brasil) e represa Salto Grande (Argentina-Uruguai).

Foram formulados balanços contínuos (ou seriados) mensais para a série 1968-1997, período que conta com informação de variáveis hidrometeorológicas. O método utilizado foi o de Thornthwaite para capacidades de armazenamento entre 100 e 150 mm.

La cuenca del río Uruguay fue desagregada en 3 tramos en las secciones de Caxambú (Brasil), Paso de los Libres (Argentina-Brasil) y represa Salto Grande (Argentina -Uruguay).

Se formularon balances continuos (o seriados) a nivel mensual para la serie 1968-1997, período coincidente con que se cuenta información de variables hidrometeorológicas. El método utilizado fue el de Thornthwaite para capacidades de almacenamiento comprendidas entre 100 y 150mm.

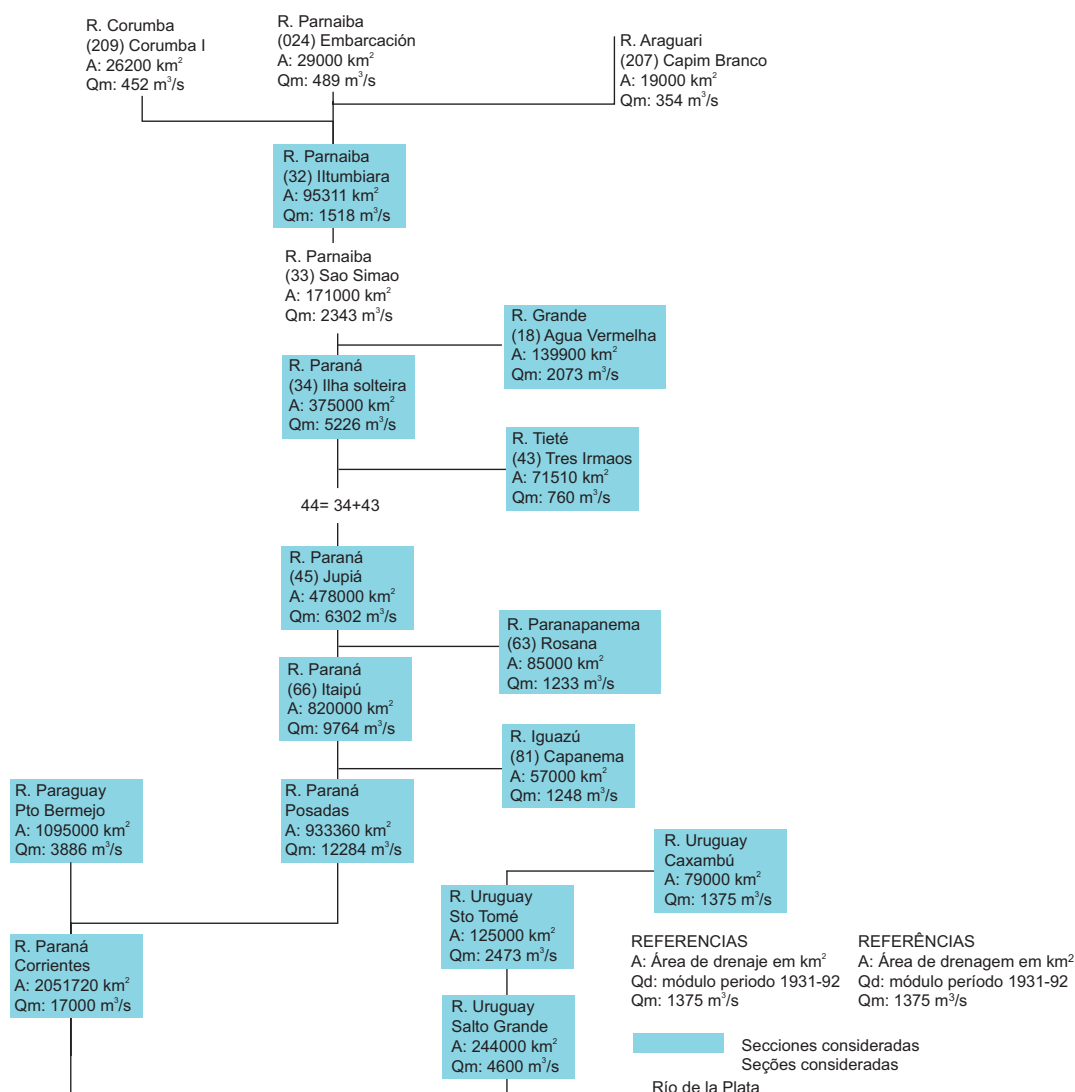


Figura 20.-
Diagrama de contribuições. Bacia do Rio da Prata.

Figura 20.-
Diagrama de aportes Cuenca del Río de la Plata.

Para determinar as relações entre as variáveis atmosféricas de entrada e saída (precipitações e evapotranspirações) nas principais bacias, os resultados pontuais dos balanços hídricos obtidos para cada uma das estações foram ponderados em áreas por meio do método dos polígonos de Thiessen.

Para determinar las relaciones entre las variables atmosféricas de ingreso y salida (precipitaciones-evapotranspiración) a nivel de las principales cuencas, los resultados puntuales de los balances hídricos obtenidos para cada una de las estaciones fueron ponderados arealmente por el método de polígonos de Thiessen.

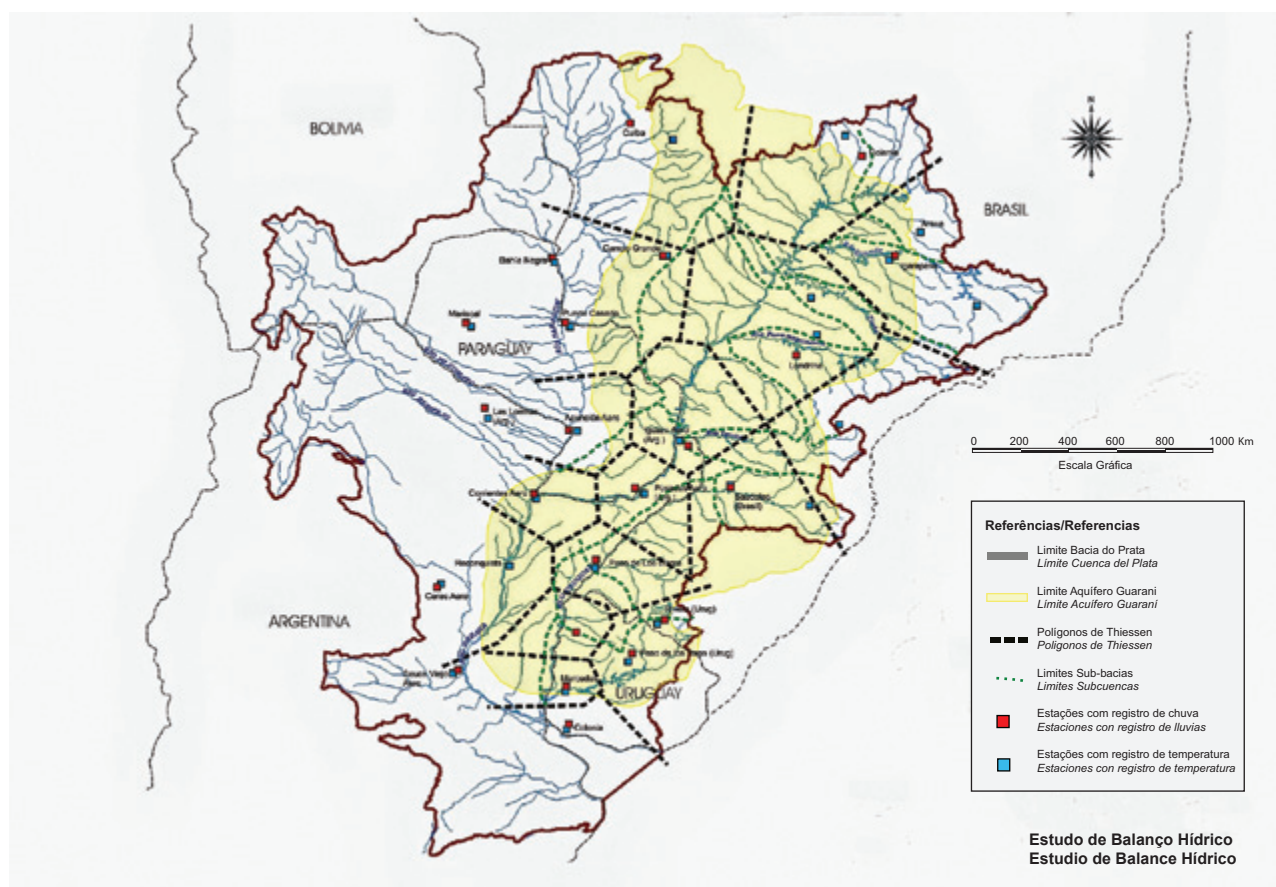


Figura 21.-
Polígonos de Thiessen.

Figura 21.-
Polígonos de Thiessen.

Resultados

Na parte superior da alta bacia, até as proximidades da Ilha Solteira, as disponibilidades hídricas anuais médias estão entre os 300 e os 400 mm de oeste a leste, enquanto os *deficits* anuais médios apresentam valores importantes, com evidente variação de oeste a leste entre 350 e 150 mm. Nas variações cronológicas no oeste (Cuiabá), observa-se tendência ao aumento dos excessos. Na parte

Resultados

En la parte superior de la alta cuenca, aproximadamente hasta Ilha Solteira las disponibilidades hídricas medias anuales están entre los 300 y 400mm de oeste a este, mientras que los *déficits* medios anuales presentan valores importantes con marcada variación de oeste a este entre 350 y 150 mm. En las variaciones cronológicas en el oeste (Cuiaba) se presenta una

Nos meses com EXC nulos, o escoamento mínimo nos cursos provém, fundamentalmente, do fluxo de base (águas subterrâneas descarregadas no leito dos rios) e está entre 10 e 15 mm por mês. Dado o importante tamanho das áreas de contribuição das sub-bacias analisadas, a memória hidrológica dos cursos é importante e por isso a contribuição do escoamento superficial direto de escoamento no leito não se esgota nos períodos de seca e compõe parte do escoamento mínimo conhecido como fluxo-base.

Na Bacia superior do Rio Paraná (Ilha Solteira) e em seus principais afluentes (Rios Paranaíba e Grande) foi registrado, a partir de 1975, um aumento das vazões mínimas, passando de 10 para 15 mm/mês. Nos outros afluentes e na Bacia do Rio Uruguai, o fluxo mínimo (base) manteve-se constante ao longo de todo o período de análise, em torno de 10mm/mês.

Aspectos socioeconômicos

A população residente sobre a área de ocorrência do aquífero foi estimada em aproximadamente 90 milhões de pessoas. Isso corresponde aproximadamente à metade da população dos quatro países do SAG, como mostra a tabela (FERNÁNDEZ et al., 2007).

En los meses con EXC nulos el escurrimiento mínimo en los cursos es aportado fundamentalmente por el flujo base (constituido por agua subterránea descargada en el cauce fluvial) y está en el orden de 10- 15mm/mes. Dado el importante tamaño de las áreas de aportes de las subcuencas analizadas, la memoria hidrológica de los cursos es importante y por ello el aporte de flujo directo escurriendo encauzado no se agota entre períodos lluviosos y compone parte del escurrimiento mínimo que simplificadaamente llamamos flujo base.

Para la cuenca superior del río Paraná (Ilha Solteira) y sus principales afluentes río Paranaíba y Grande, a partir de 1975 se registra un incremento del umbral de caudales mínimos, pasando de 10mm/mes a 15mm/mes. En el resto de los afluentes y cuenca del río Uruguay, el flujo mínimo -base- se mantiene constante para todo el período de análisis y es del orden de 10mm/mes.

Aspectos socio-económicos

La población residente sobre el área de ocurrencia del acuífero fue estimada en unos 90 millones de habitantes, lo que significa cerca de la mitad de la población de los cuatro países donde el SAG está presente, como se puede ver en la tabla (FERNÁNDEZ et al., 2007).

País	População sobre o SAG	Porcentagem da população do país	Porcentagem da população do SAG
Argentina	7.947.667	20,59	8,64
Brasil	80.141.415	42,99	87,04
Paraguai	3.263.318	55,91	3,54
Uruguai	724.768	21,92	0,78
Total	92.077.168	46,67	100

Dados demográficos do SAG (modificado e compilado de FERNÁNDEZ et al., 2007).

País	Población sobre el SAG	Porcentaje de la población del país	Porcentaje de la población del SAG
Argentina	7.947.667	20,59	8,64
Brasil	80.141.415	42,99	87,04
Paraguay	3.263.318	55,91	3,54
Uruguay	724.768	21,92	0,78
Total	92.077.168	46,67	100

Datos demográficos del SAG (Modificado y Compilado de FERNÁNDEZ et al., 2007).

Na área de ocorrência do SAG, a distribuição da população residente, ao ser comparada com a distribuição da população dos quatro países, é bastante diferente. A maior população residente sobre o SAG é a brasileira, com aproximadamente 90% do total. Quase a metade da população brasileira vive sobre o SAG. Pouco mais de 3% da população que vive sobre o SAG é paraguaia. Da mesma forma, a metade da população paraguaia vive sobre o aquífero.

A distribuição da população na área de ocorrência do SAG não é uniforme, variando de 2,5 habitantes por km² no Estado do Mato Grosso a 118,6 habitantes por km² no Estado de São Paulo. O mapa da figura 22 traz esses dados. A densidade populacional média da área do SAG é de 22,8 hab./km², e a região central e a região ocidental apresentam as maiores densidades demográficas.

O Brasil, a Argentina e o Uruguai apresentam quadro populacional preponderantemente urbano, com cerca de 80% a 90% da população vivendo em zonas urbanas. No Paraguai, aproximadamente a metade da população vive no campo. Essa informação é importante para projeções futuras de uso das águas subterrâneas do SAG.

En el área de ocurrencia del SAG, la distribución de la población residente, al ser comparada con la distribución de la población de los cuatro países, es bastante diferente, la mayor población residente es la brasilera, con cerca del 90 % del total, y que representa casi la mitad de la población del Brasil. En Paraguay la población residente sobre el área de ocurrencia del acuífero representa poco más del 3% de la población total residente sobre el SAG, pero comprende la mitad de la población del país.

De manera análoga, la distribución de la población en el área de ocurrencia del SAG no es uniforme, variando de 2.5 habitantes por km² en el estado de Mato Grosso hasta el valor máximo de 118.6 habitantes por km² en el estado de São Paulo, según puede ser visualizado en el mapa de la figura 22. La densidad poblacional media del área es de 22.8 hab/km², observándose que la región central y la región occidental presentan las mayores densidades demográficas.

A excepción del territorio paraguayo, los otros países presentan un cuadro poblacional preponderantemente urbano, con cerca de 80 a 90% de la población viviendo en las zonas urbanas, mientras que en Paraguay, cerca de la mitad de la población vive en el campo, lo que para proyecciones futuras de uso de las aguas subterráneas del SAG es relevante, pues proyecta usos y distintas demandas.

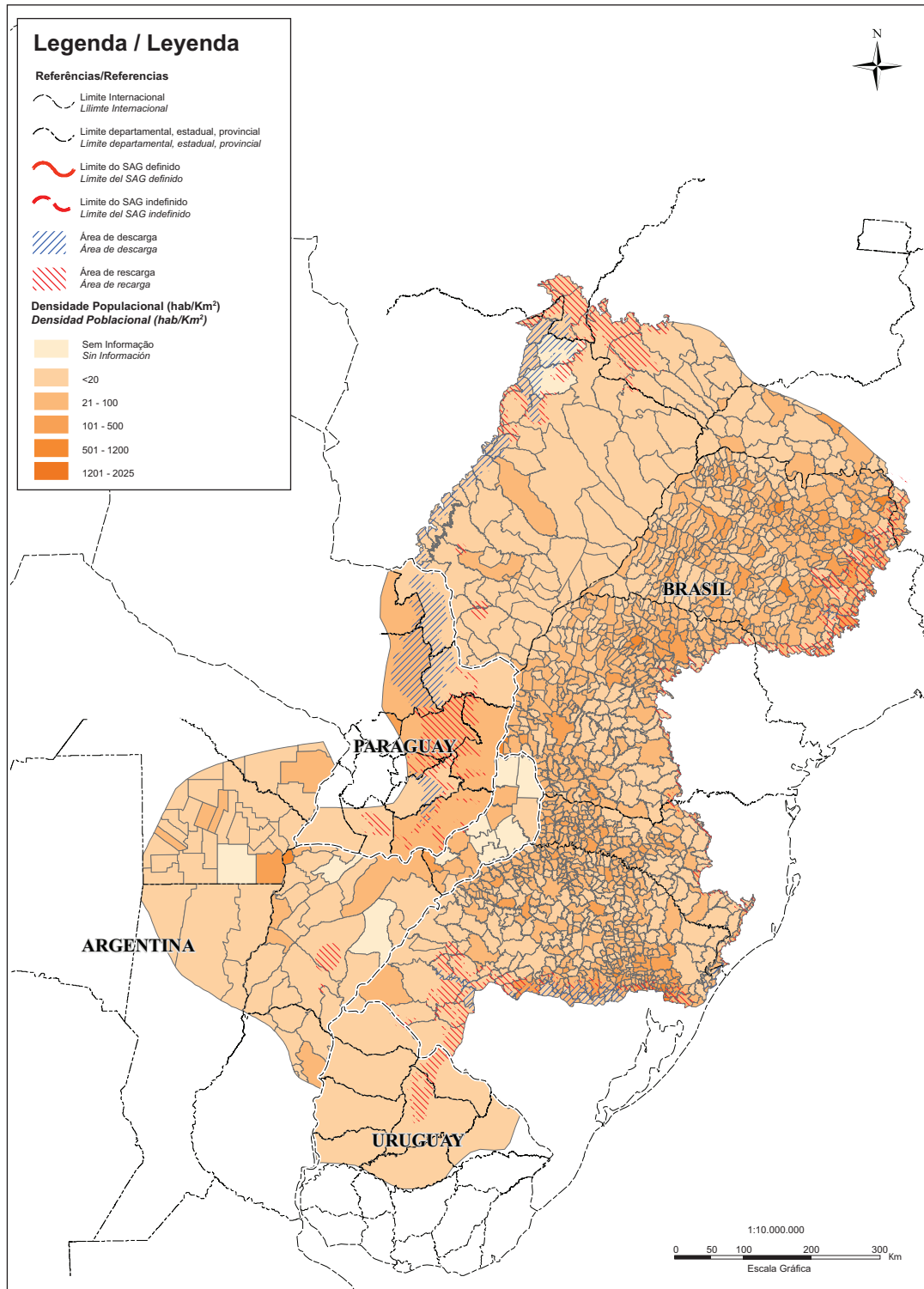


Figura 22.-
Mapa de distribuição da densidade demográfica por unidade administrativa.

Figura 22.-
Mapa de distribución de la densidad demográfica por unidad administrativa.

A análise do Produto Interno Bruto (PIB) da região revela que o Brasil possui maior força econômica que seus vizinhos. Já a distribuição da riqueza, avaliada no PIB *per capita*, é semelhante na Argentina, no Brasil e no Uruguai, sendo mais desigual no caso paraguaio (ver tabela).

Os países da região apresentam um perfil econômico claramente baseado em serviços (setor terciário). Esse setor gera mais de 50% da riqueza da região. No caso do Brasil, o setor secundário, ou seja, o setor industrial, ocupa o segundo lugar em participação no PIB. No Paraguai, essa posição é ocupada pelo setor primário, ou seja, pelas atividades agrícolas.

El análisis del PIB (Producto Interno Bruto) de la región muestra la mayor fuerza de la economía brasilera sobre sus vecinos, ya la distribución de estas riquezas, evaluada en el PIB per cápita, es semejante entre Argentina, Brasil y Uruguay, pero muy abajo para la población paraguaya. (Ver tabla adjunta)

Los países de la región presentan un perfil económico claramente basado en actividades de servicio (3º sector) que generan más del 50 % de la riqueza en la región, se puede distinguir que en Brasil, la segunda mayor participación del PIB está relacionada a actividades del 2º sector (Industrial), mientras que en Paraguay esta participación está relacionada a actividades agrícolas del 1º sector.

País	PIB (milhões de US\$)	% do PIB da área	PIB <i>per capita</i> (US\$)	% PIB – setor primário	% PIB – setor secundário	% PIB – setor terciário
Argentina	219.652	18,10	5.636	16,1	29,9	54,0
Brasil	966.827	79,66	5.085	13,6	33,2	53,2
Paraguai	8.633	0,71	1.356	24,0	23,2	52,8
Uruguai	18.591	1,53	5.345	11,8	28,6	59,6

Resumo dos dados econômicos dos países onde o SAG está presente (modificado e compilado de FERNÁNDEZ et al., 2007).

País	PIB (millones US\$)	% del PIB del área	PIB <i>per cápita</i> (US\$)	% PIB – 1º Sector	% PIB – 2º Sector	% PIB – 3º Sector
Argentina	219.652	18,10	5.636	16,1	29,9	54,0
Brasil	966.827	79,66	5.085	13,6	33,2	53,2
Paraguai	8.633	0,71	1.356	24,0	23,2	52,8
Uruguai	18.591	1,53	5.345	11,8	28,6	59,6

Resumen de los datos económicos de los países donde el SAG está presente (Modificado y Compilado de FERNÁNDEZ et al., 2007).

Mudanças no uso do solo

Foram elaborados mapas que relatam as mudanças no uso do solo desde os anos 1970. Esses mapas englobam toda a área do Sistema Aquífero Guarani. Entende-se por uso do solo o resultado da síntese da ação antrópica sobre o meio natural.

A cobertura vegetal de uma região sofre mudanças rapidamente, sendo necessário contar com informação cartográfica atualizada sobre o uso

Cambios en el uso del suelo

Se elaboraron mapas de cambios en el Uso del Suelo durante el periodo comprendido entre la década del setenta ('70) y la actualidad; en la zona definida como área del Sistema Acuífero Guaraní. Se entiende por Uso del Suelo como el resultado de la síntesis de la acción antrópica y el medio natural.

La cubierta vegetal de una región sufre cambios rápidamente siendo necesario contar con

do solo. Essa informação deve ser confiável e objetiva. O objetivo geral deste trabalho engloba a elaboração e a avaliação multitemporal das mudanças no uso do solo.

Na elaboração dos mapas de uso do solo foi adotada uma adaptação da classificação de uso e cobertura da terra do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Foi realizado um estudo multitemporal no qual foram elaborados mapas temáticos de uso do solo em diferentes momentos. Com isso, busca-se avaliar a dinâmica da utilização do solo, como, por exemplo, a dinâmica das fronteiras agrícolas. Foram selecionadas duas datas dentro dos últimos trinta anos nas quais foram feitas imagens de satélite e sobre elas foi adotada a mesma metodologia utilizada com as imagens atuais.

Assim, os dados registrados se traduziram na separação de diversos elementos da paisagem (cursos e corpos de água superficiais, afloramentos rochosos, cobertura vegetal, entre outros) e de atividades antrópicas gerais (núcleos urbanos, estradas, plantações, entre outras). Essa análise foi desenvolvida de forma comparativa para evidenciar as mudanças no período entre 1973 e 2007, que correspondem às datas das imagens disponíveis em arquivo.

información cartográfica actualizada sobre el Uso del Suelo y a su vez que la misma sea confiable y objetiva, El objetivo general de este trabajo propone la elaboración y evaluación multitemporal del cambio en el uso del suelo.

Se adoptó para elaborar los mapas de Uso del Suelo una adaptación de la clasificación de Uso y Cobertura de la Tierra del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

Se realizó un Estudio Multitemporal que consiste en realizar mapas temáticos de uso del suelo en diferentes fechas de toma, a efectos de evaluar la dinámica en la utilización del mismo (por ejemplo avance de la frontera agrícola); se seleccionaron 2 fechas dentro de los últimos 30 años con disponibilidad de imágenes satelitales, y se desarrollo la misma metodología con las imágenes de fecha actual.

Así, los datos registrados se tradujeron en la separación de distintos elementos del paisaje: (cursos y cuerpos de aguas superficiales, afloramientos rocosos, cobertura vegetal, etc.), actividades antrópicas generales (núcleos urbanos, rutas, cultivos agrícolas). Este análisis se desarrolló en forma comparativa o multitemporal para evidenciar los cambios en el periodo 1973 – 2007 correspondiente a las fechas de toma de imágenes disponibles en archivo.

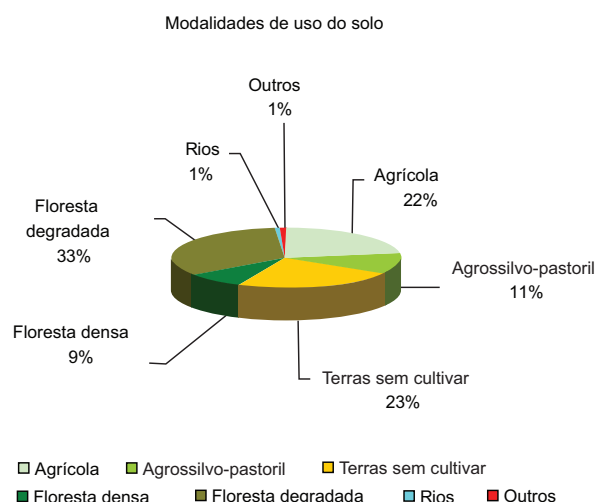


Figura 23.-
Uso do solo período 1973-1980.

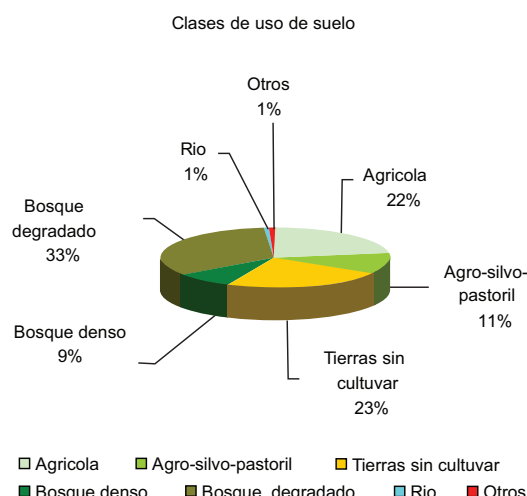


Figura 23.-
Clases de uso de suelo período 1973-1980.

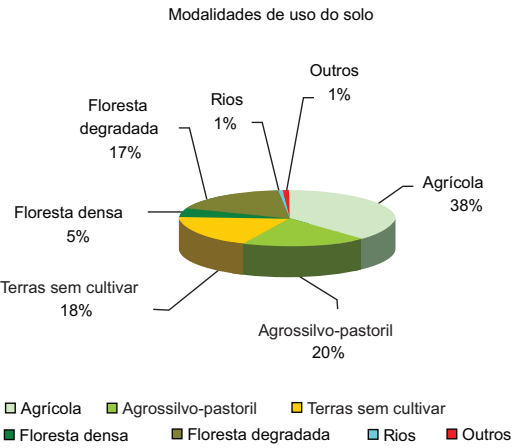


Figura 24.-
Uso do solo período 1990.

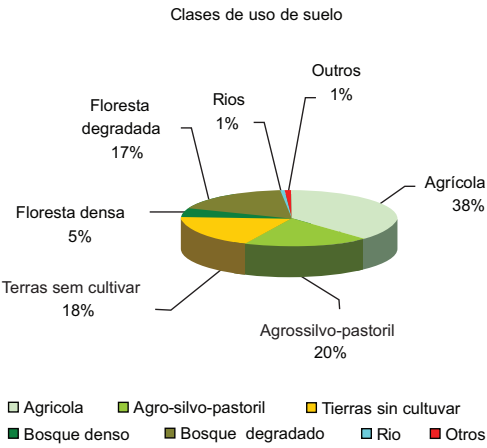


Figura 24.-
Clases de uso de suelo período 1990.

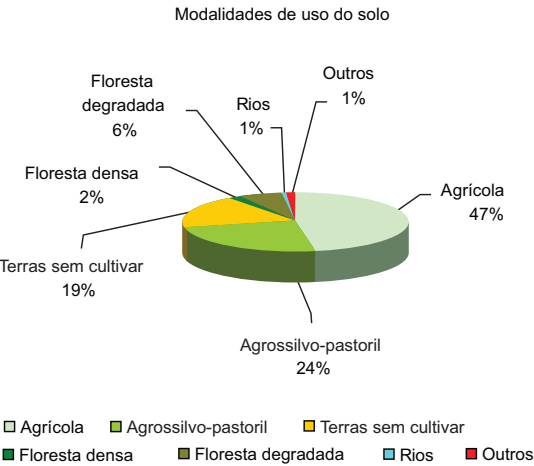


Figura 25.-
Uso do solo por período 2007.

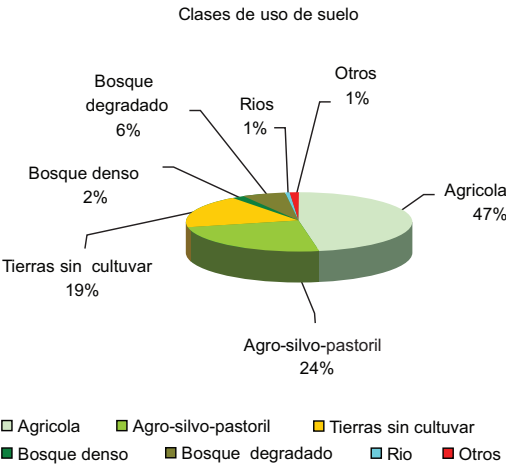


Figura 25.-
Clases de uso de suelo por período 2007.

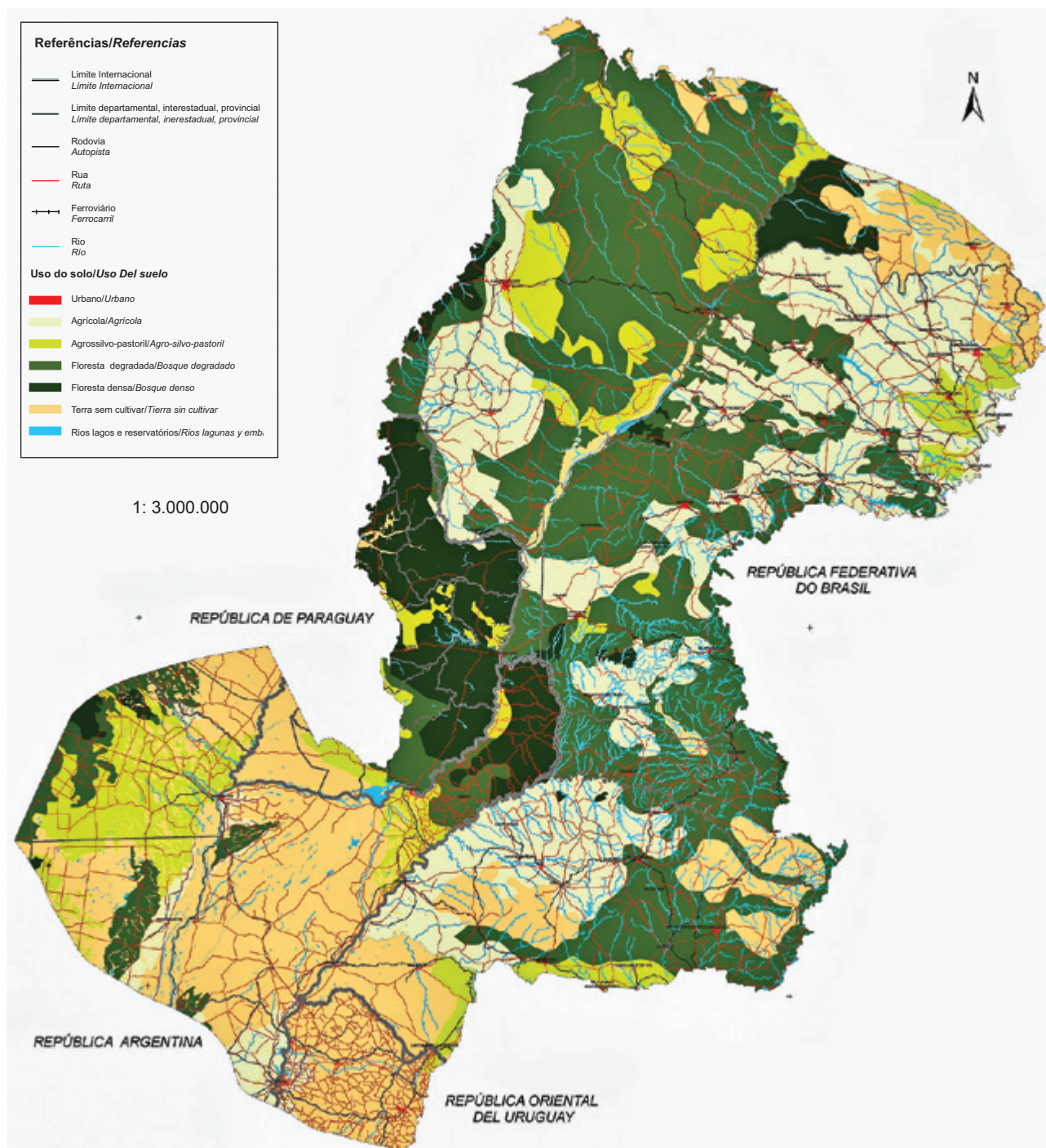


Figura 26.-
Mapa do uso do solo por período 1973-1980.

Figura 26.-
Mapa de uso del suelo por período 1973-1980.

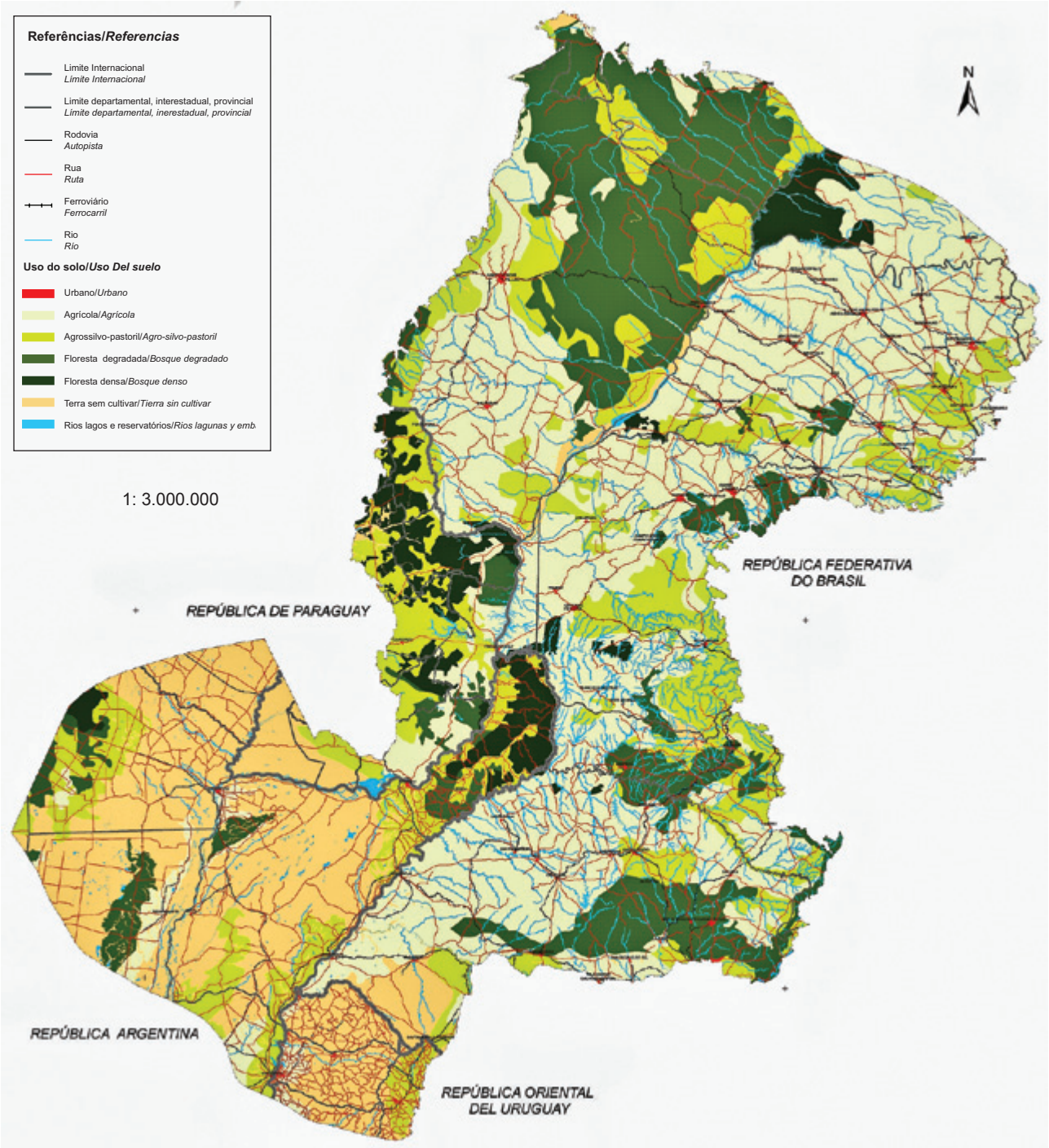


Figura 27.-
Mapa do uso do solo por período 1990.

Figura 27.-
Mapa de uso del suelo por período 1990.

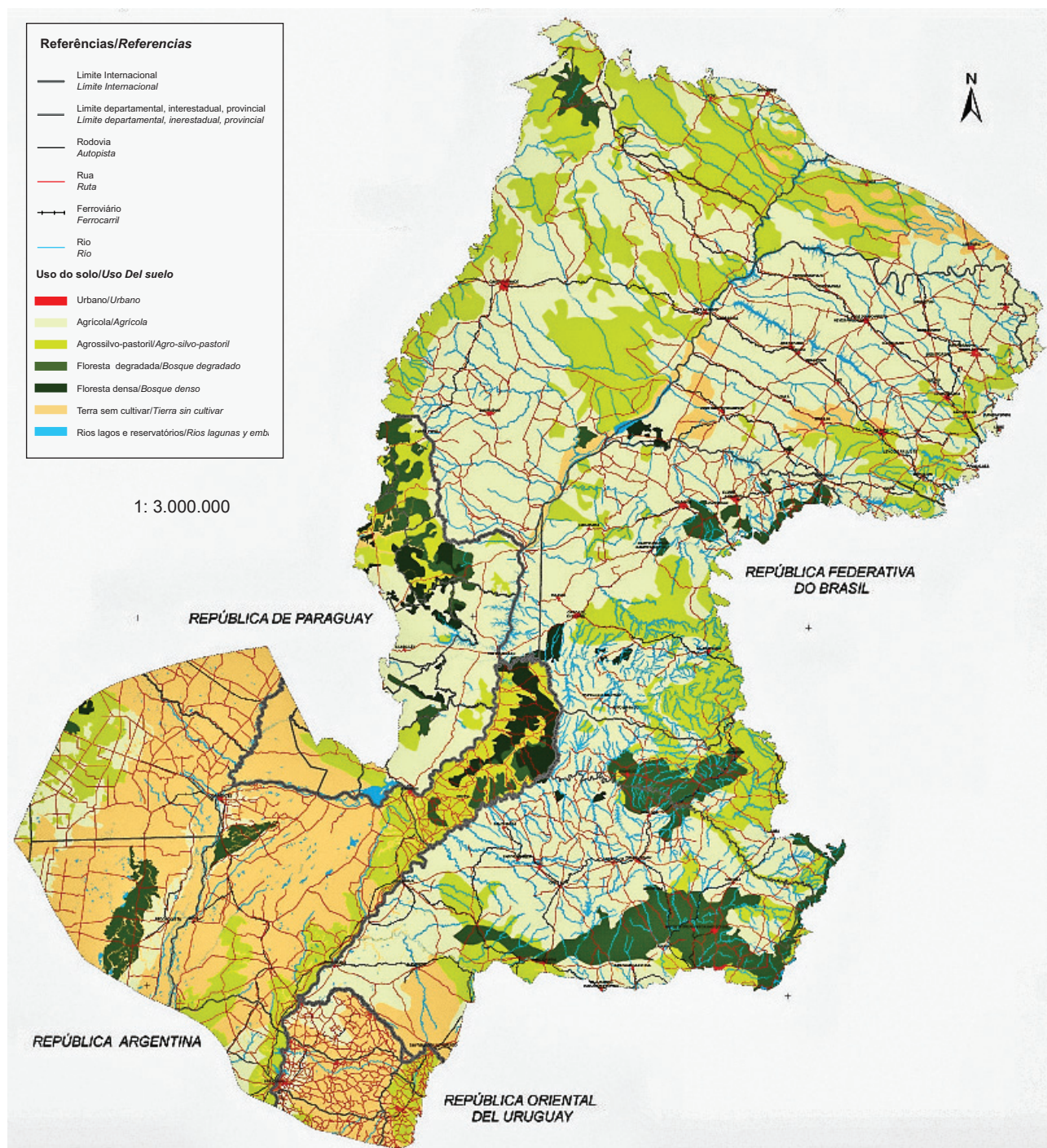


Figura 28.-
Mapa do uso do solo por período 2007.

Figura 28.-
Mapa de uso del suelo por período 2007.

Análise dos resultados

A análise dos mapas de uso do solo mostra que as modalidades de uso que apresentaram maiores mudanças foram:

- A agricultura, que ocupava 22% do território no período 1973-1980, passou a ocupar 47% na atualidade.
- A atividade agrossilvo-pastoril, que ocupava 11% do território no período 1973-1980, passou a ocupar 23% em 2007.
- A floresta densa (floresta nativa), que ocupava 9% do território no período 1973-1980, passou a ocupar 2% em 2007.
- As florestas degradadas, que ocupavam 33% do território, passaram a ocupar 6%.
- As terras sem cultivar, que ocupavam 23% do território no período 1973-1980, diminuíram até o ano de 1990 e depois mantiveram uma ocupação na ordem de 18% do território.

Entretanto, ao analisar a floresta densa e a floresta degradada como uma única classe, observa-se que no período entre 1973 e 1980 elas ocupavam 42% da superfície da área de ocorrência do SAG, diminuindo para 8% por causa do avanço da atividade agropecuária.

A atividade agrícola apresenta a segunda maior variação (25%). Sua expansão ocorreu principalmente em direção à mata nativa.

Uso do SAG

Com relação ao destino do recurso hídrico explorado dos poços do SAG, observa-se que o principal é o abastecimento público. No Brasil, a distribuição do uso da água, apesar de prevalecer o uso público, ocorre de forma mais diversificada. Na Argentina, os poços registrados são explorados unicamente com fins recreativos. No Uruguai e no Paraguai, a água explorada é utilizada, principalmente, para abastecer os centros urbanos, mais de 90% da água nestes países têm esse destino.

Os poços do SAG foram classificados em categorias de acordo com a destinação da água explorada: abastecimento público, abastecimento rural, abastecimento industrial e abastecimento recreativo.

Na categoria “abastecimento público”, foram incluídos todos os poços tubulares profundos

Análisis de resultados

El análisis de los mapas de uso de suelo muestra que las clases que mayores cambios presentaron fueron:

- *La agrícola con valores que fluctuaron de 22% en el periodo 73-80 a un 47 % en la actualidad.*
- *La agro-silvo-pastoril de un 11% en el periodo 1973-1980 a un 23 % para el año 2007*
- *El Bosque denso (selvas y bosque nativo) ocupó casi un 9% para el periodo 1973-1980 disminuyendo a un 2 % en el 2007.*
- *El bosque degradado varió de un 33 % a un 6 % siendo el que mayor impacto se observó.*
- *Las tierras sin cultivar (clase erial) en el periodo 1973-1980 ocupaban aproximadamente un 23% disminuyó para el año 1990 y se mantuvo hasta la actualidad en el orden del 18 %.*

Por otro lado, si se analizan las clases Bosque denso y bosque degradado tomada como una sola clase, se observa que al periodo 1973-1980 constituían un 42 % de la superficie del Acuífero y por el avance de las actividades agropecuarias se redujo a un 8 % en la actualidad.

A su vez la clase agrícola es la segunda en importancia por la variación observada (25 %) dado que su mayor desarrollo se produjo sobre las áreas de bosque.

Uso del SAG

Con relación al uso dado al recurso hídrico captado por los pozos en el área del SAG, se observa un destino principal para abastecimiento público. En Brasil, la distribución del uso del agua, a pesar de prevalecer para el uso público, se da de manera más diversificada; en Argentina no existe tal diversificación, los pozos registrados se usan únicamente para la explotación del agua con fines recreativos. En Uruguay y Paraguay, el destino final del agua es principalmente para abastecimiento de centros urbanos, prevaleciendo en estos dos países más del 90% del uso del recurso para este fin.

Con relación a la tipología del uso de las aguas subterráneas, los pozos fueron clasificados en categorías de usos, a saber: abastecimiento público, abastecimiento rural, abastecimiento industrial y abastecimiento recreativo.

En la categoría abastecimiento público, fueron relevados todos los pozos tubulares profundos cuya agua es extraída con la finalidad de atender

explotados para atender às necessidades de consumo da população e que são operados por concessionários públicos (também foram incluídos poços operados por outras entidades, mas que são usados para abastecimento público).

Os poços da categoria “abastecimento rural” são aqueles cujas águas atendem às necessidades do campo, incluindo a irrigação, a dessedentação animais e o consumo humano.

Os poços da categoria “abastecimento industrial” são aqueles que abastecem as atividades industriais de transformação, incluindo a agroindústria, a mineração, a indústria têxtil, a indústria química e a metalurgia (figura 29).

las necesidades de consumo de la población y son operados en su mayoría por concesionarias públicas; también fueron incluidos los pozos cuyo uso de agua es para abastecimiento humano y los mismos no son operados por concesionarios públicos de servicio de agua.

Los pozos de la categoría abastecimiento rural son aquellos cuyo consumo final es realizado en el área rural, incluyendo usos para la irrigación, abrevado de animales y consumo humano.

El consumo industrial se refiere a los pozos que abastecen las actividades industriales de transformación, incluyendo actividades agroindustriales, mineras, textiles, químicas y metalúrgicas. (Figura 29)

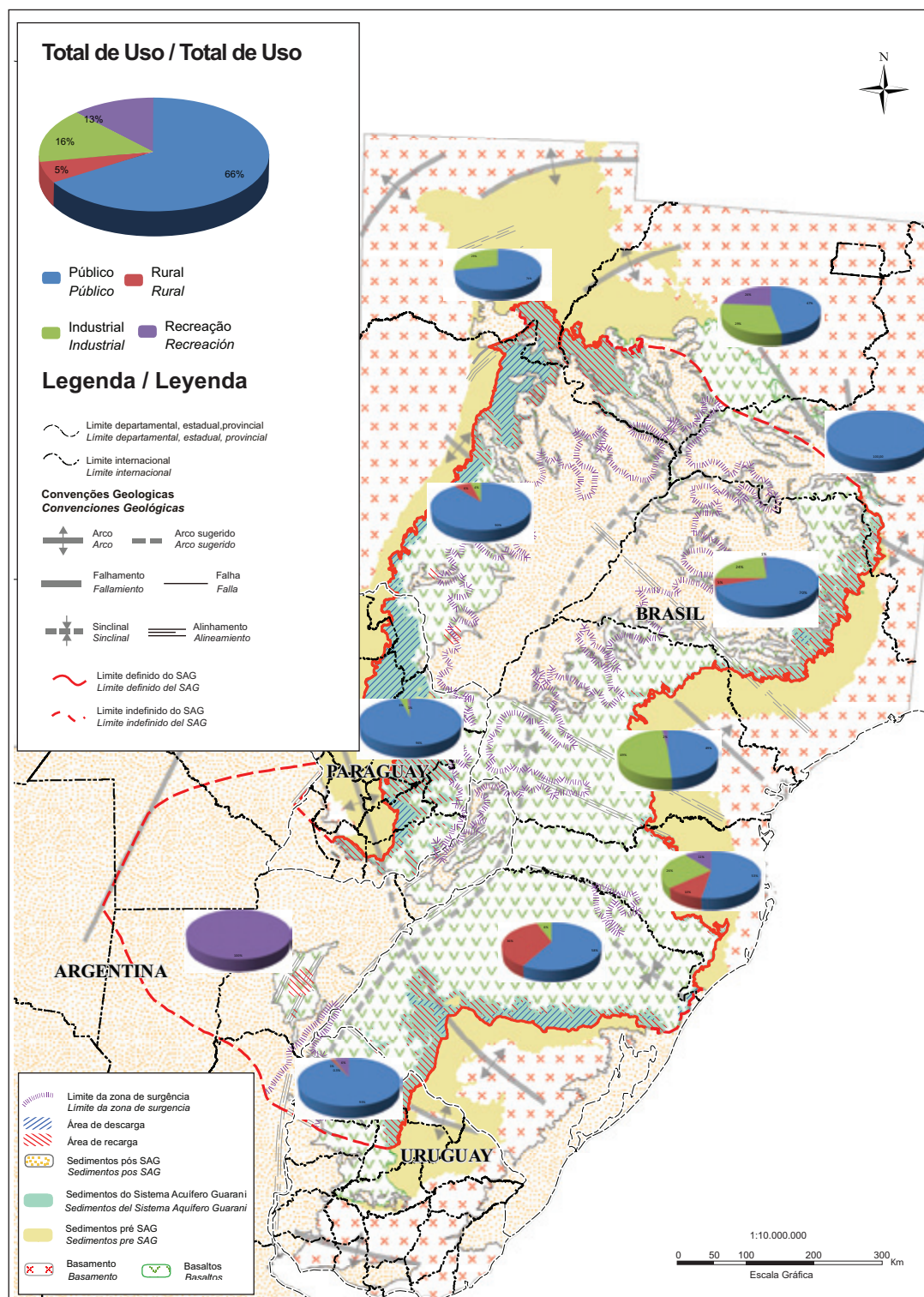


Figura 29.-
Mapa de uso dos aquíferos.

Figura 29.-
Mapa de usos del acuífero.

A avaliação do uso das águas do SAG indica uma extração da ordem de $1,04 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$, com maior intensidade no território brasileiro, responsável por cerca de 90% da extração atual do aquífero, sendo o Estado de São Paulo o principal explorador.

La evaluación del uso de las aguas del SAG, indica volúmenes extraídos del orden de $1,04 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$, con mayor intensidad en territorio brasileiro, responsable por cerca del 90% de la extracción actual del acuífero, siendo el estado de São Paulo el principal.

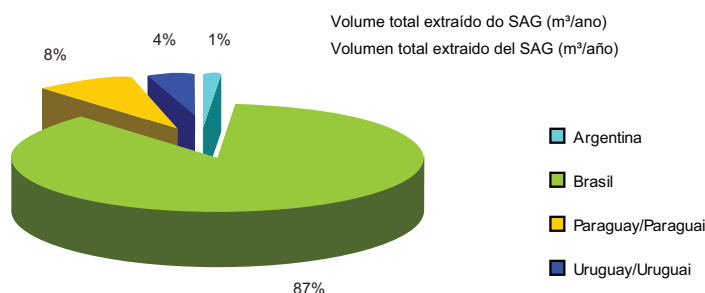


Figura 30.-
Volume total extraído do SAG m^3/ano .

Figura 30.-
Volume total extraído do SAG m^3/ano .

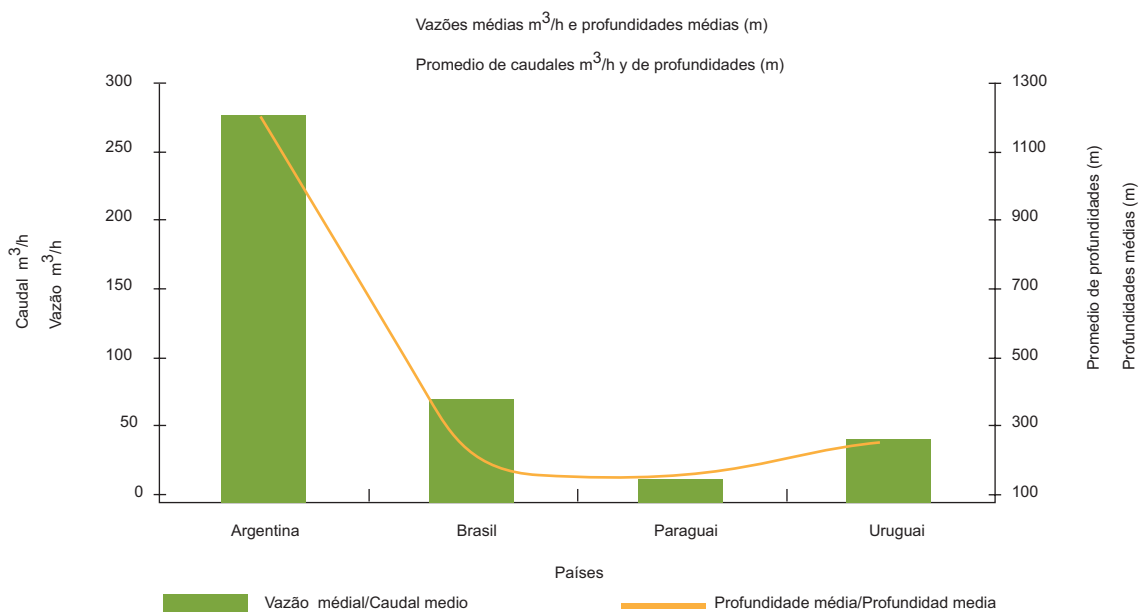


Figura 31.-
Vazão média explorada por profundidade média dos poços registrado no SAG.

Figura 31.-
Caudal medio explotado por profundidad media de los pozos registrado en el SAG.

O gráfico da figura 31 compara as vazões médias explotadas (m^3/h) com as profundidades médias dos poços registrados. É possível verificar um decréscimo da extração na medida em que as profundidades dos poços decrescem.

Es de hacer notar que al construir un gráfico (figura 31), con los caudales medios explotados (m^3/h) y contrastar los volúmenes extraídos con la profundidad media de los pozos registrados, es posible verificar un decrecimiento de la

Caracterização hidrotermal do SAG

As temperaturas das águas do SAG ampliaram em função do aumento da profundidade do trecho do aquífero. Na maior parte da área confinada do SAG, as temperaturas variam de 35° a 55 °C. As temperaturas máximas observadas são de aproximadamente 65 °C, podendo existir áreas limitadas nas quais a temperatura da água é mais elevada, podendo chegar a 80°C. O mapa da figura 31 apresenta a distribuição das temperaturas na forma de isotermas. Sua análise permite observar uma classificação segundo zonas de acordo com faixas de variação da temperatura. Cada faixa de temperatura estaria, *a priori*, associada a certos tipos de usos geotermiais, conforme pode ser observado na tabela a seguir.

As temperaturas observadas no SAG estão dentro de uma faixa considerada de baixa entalpia. A zona do aquífero de maior potencial disponível seria a região oeste do Estado de São Paulo, no Brasil, onde a potência térmica é da ordem de 240 kW/kg/s. A extração dessa potência térmica demandaria uma potência mecânica do equipamento de bombeamento 1.5kW/kg/s, supondo que a piezometria disponível não é suficiente para extrair o volume necessário para satisfazer a potência térmica requerida. Nessa mesma zona, estaria à disposição uma potência térmica de 160kW por cada kW de potência térmica referente à potência mecânica disponível. Observa-se que tanto a potência térmica quanto a potência mecânica decrescem na direção dos limites exteriores do SAG.

extracción a medida que las profundidades de los pozos decrecen.

Caracterización Hidrotermal del SAG

Las temperaturas de las aguas del SAG, aumentan en función del incremento de la profundidad del techo del acuífero. En la mayor parte del área confinada del SAG, las temperaturas varían de 35 a 55°C. Las máximas temperaturas observadas alcanzan valores del orden de 65°C, pudiendo existir áreas limitadas con temperatura del agua más elevada en el rango de los 80°C. El Mapa de la Figura 31 presenta la distribución de las temperaturas en forma de isotermas, siendo que de su análisis se desprende una clasificación según zonas de acuerdo a los rangos de temperatura. Cada rango de temperatura, a priori, estaría asociado a ciertos tipos de usos geotermiales, conforme puede ser visto en el Cuadro al final del parágrafo.

Las temperaturas ocurrentes en el SAG se encuentran dentro de una faja, considerada de baja entalpía. Se destaca que la zona del acuífero donde se tiene la mayor potencia disponible sería la región Oeste del estado de São Paulo en Brasil en donde se tendría del orden de 240kW/kg/s de potencia térmica. La extracción de esta potencia térmica demandaría una potencia mecánica del equipo de bombeo de 1.5kW/kg/s, suponiendo que la piezometría disponible no resulta suficiente para aportar el volumen de agua que implica fluir para satisfacer la potencia térmica requerida. En esa misma zona se dispondrían 160kW de potencia térmica por cada kW de potencia mecánica que se aporte. Se observa que tanto la potencia térmica como la potencia térmica referida a la potencia mecánica decrecen hacia los bordes exteriores del SAG.

Zonas hidrotermais SAG	Uso atual no SAG	Potencial de uso
Zona 1- (<30°C)		Bomba de calor geotérmico, aquecimento do solo, aquicultura, controle de geadas, aquecimento e refrigeração de casas, aquecimento de água, balneários.
Zona 2- (30°C -50°C)	Uso turístico/zona hidrotermal Salto-Concórdia	Cultivo de fungos, carbonatação de bebidas, estufas e esterilização de solos, aquicultura, preparação de concreto, balneários, controle de geadas, aquecimento e refrigeração de casas, aquecimento de água, pasteurização, lavagem de frangos.
Zona 3- (>50°C)		Secagem de frutas e vegetais, carbonatação de bebidas, estufas e esterilização de solos, processamento de madeira e papel, preparação de concreto, processamento de alimentos, controle de geadas, aquecimento e refrigeração de casas, aquecimento de água, pasteurização.

Fonte: Elaborado para o PEA, adaptado do relatório de avaliação de potencial de usos termais e não termais das águas do SAG, Consórcio Guaraní, 2008.

Zonas hidrotermales SAG	Uso actual en el SAG	Potencial de uso
Zona 1- (<30°C)		Bomba de calor geotérmico, calentamiento de suelo, acuicultura, control de heladas, calefacción y refrigeración de viviendas, calentamiento de agua, baños (balnearios).
Zona 2- (30°C -50°C)	Uso turístico/franja hidrotermal Salto-Concordia	Cultivo de hongos, carbonatación de bebidas, invernaderos y esterilización de suelos, acuicultura, curado de hormigón, baños, control de heladas, calefacción y refrigeración de viviendas, calentamiento de agua, pasteurización, pelado de pollos.
Zona 3- (>50°C)		Secado de frutas y vegetales, carbonización de bebidas, invernaderos y esterilización de suelos, procesamiento de pulpa de madera y papel, curado de hormigón, procesamiento de alimentos, control de heladas, calefacción y refrigeración de viviendas-calentamiento de agua, pasteurización.

Fonte: Elaborado para el PEA, adaptado del informe de evaluación de potencial de usos termales y no termales de agua del SAG, Consorcio Guaraní, 2008.

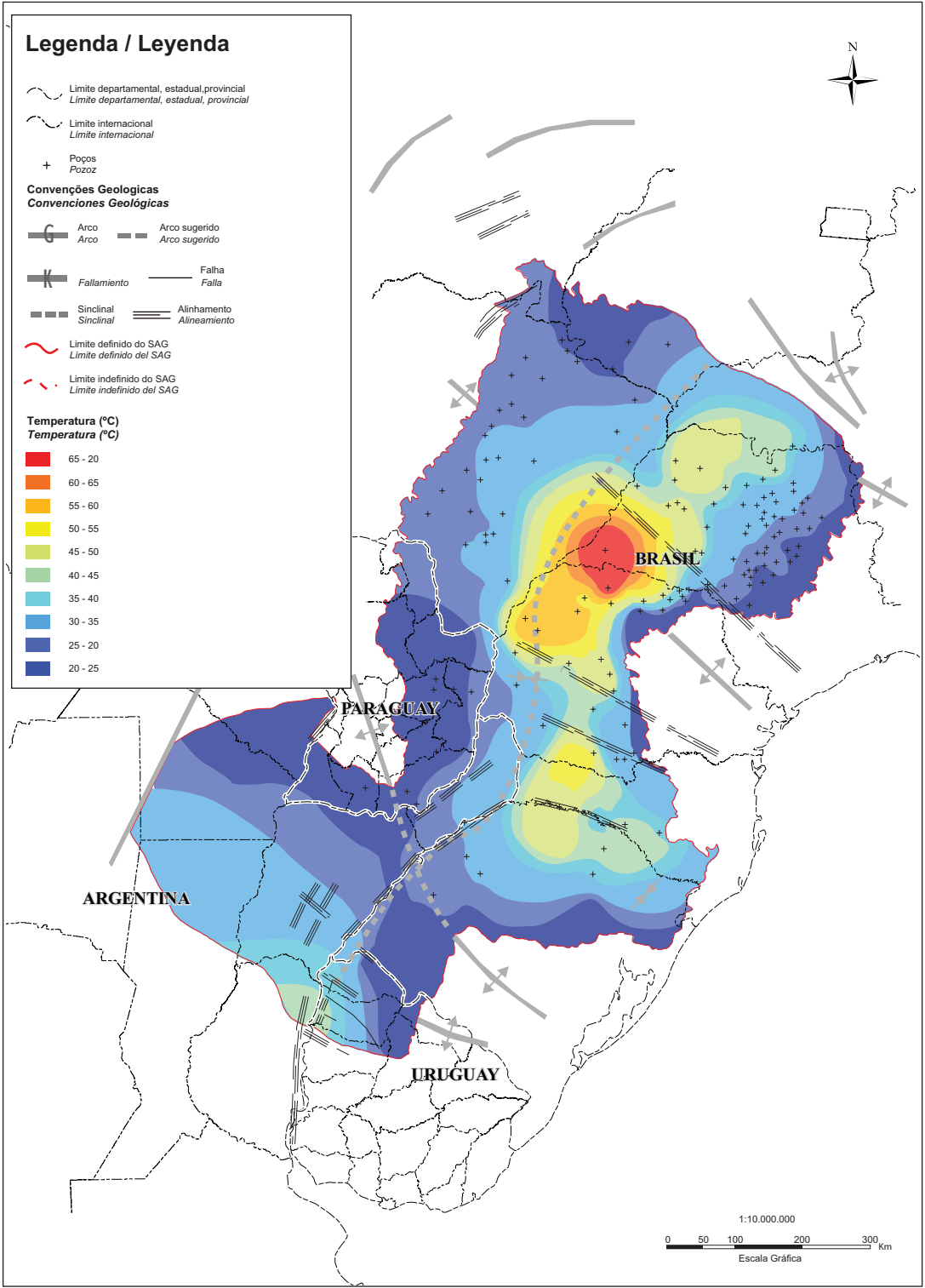


Figura 31.-
Mapa de isotermas do SAG.

Figura 31.-
Mapa de isotermas del SAG.

4 HIDROGEOLOGIA

Aspectos hidrodinâmicos do SAG

A avaliação das direções de fluxo das águas subterrâneas do SAG foi feita a partir dos níveis estáticos da água medidos em poços perfurados no aquífero, o que permite a construção do mapa potenciométrico (níveis da água de acordo com sua pressão no aquífero), com a definição das condições e direções preferenciais de fluxo das águas subterrâneas no aquífero, as zonas de recarga e descarga e as zonas de surgência (figura 34).

Estes dados foram obtidos a partir da base de dados hidrogeológicos do Projeto Guaraní e são valores de níveis estáticos medidos na época da construção dos poços, mas alguns dados foram atualizados pelos trabalhos de inventário e amostragem que foram realizados por meio dos contratos celebrados no âmbito da execução do Projeto. Como não existe um programa regular de medição dos níveis piezométricos em nenhum dos países de ocorrência do SAG, as medições contêm entre si um amplo espaço de tempo. Por isso, o mapa da figura 34 deve ser considerado apenas uma representação do modelo conceitual regional do de fluxo das águas subterrâneas no SAG. Não representa as condições atuais da superfície potenciométrica, que localmente pode estar afetada por bombeamento prolongado e excessivo.

Os arenitos da Formação Botucatu e do membro superior da Formação Tacuarembó apresentam valores de porosidade entre 20% e 30%, com condutividades hidráulicas normalmente elevadas, superiores a 200 m/dia, características de poros com alta conexão.

4 HIDROGEOLOGIA

Aspectos Hidrodinámicos del SAG

La evaluación de las condiciones de flujo de las aguas subterráneas del SAG fue hecha a partir de los niveles de agua (estáticos) tomados en pozos perforados en el acuífero, que permitieron la construcción del mapa potenciométrico (niveles de agua según su presión en el acuífero), con la definición de las condiciones y direcciones preferenciales de flujo de las aguas subterráneas en el acuífero, zonas de recarga y descarga, y zonas de surgencia. (figura 34)

Estas informaciones fueron obtenidas a partir de la base de datos hidrogeológicos del Proyecto que presentan, en general, los valores medidos en la época de la construcción de los pozos, aunque algunos datos están actualizados por los trabajos de inventario y muestreo que se llevaron a cabo a través de los contratos realizados en el marco de la ejecución del Proyecto. Como no existe un programa regular de mediciones piezométricas en ninguno de los países de ocurrencia del SAG, las mediciones abarcan un amplio espacio temporal. En este sentido, este mapa debe ser considerado como la representación del modelo conceptual de flujo de las aguas subterráneas en el acuífero, no siendo indicativos de las condiciones de los niveles actuales, que localmente pueden estar afectados por bombeo prolongado y excesivo.

Las areniscas de la Formación Botucatú y del miembro superior de la Formación Tacuarembó presentan valores de porosidades entre 20 y 30 %, con permeabilidades normalmente elevadas, superiores a 200 Md, característicos de poros con alta conexión.

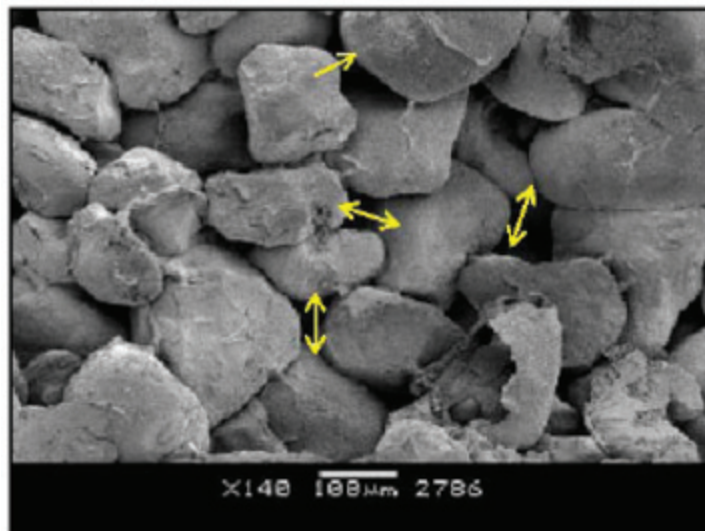


Figura 32.-

Microfotografia do arenito do membro superior da Formação Tacuarembó que mostra excelente porosidade intergranular e excelente conexão entre poros (LCV, 2008).

Regionalmente, desde as zonas de recarga até as de descarga, o fluxo das águas subterrâneas do SAG apresenta uma tendência de direcionamento regional, com sentido de norte para sul, acompanhando o eixo da Bacia do Paraná, a partir da confluência entre os Estados do Paraná e do Mato Grosso do Sul (Brasil) e do território paraguaio.

A elevação proeminente da parte leste da bacia, em seu compartimento norte, possibilitou a erosão das sequências sedimentares e a formação de zonas de recarga para o aquífero (figura 34), com uma característica de fluxo radial a partir de pontos mais elevados. Exemplos disso podem ser encontrados no extremo noroeste da faixa de afloramentos (fronteira entre São Paulo e Minas Gerais, no Brasil), no Arco de Ponta Grossa (Paraná–Brasil) e no Domo de Lages (Santa Catarina–Brasil).

As principais e mais evidentes áreas de descarga das águas do SAG estão, da mesma forma que a recarga, associadas às faixas de afloramento. Praticamente toda borda ocidental do SAG representa uma importante área de descarga que alimenta toda a rede de drenagem formadora da Bacia do Rio Paraguai, até o departamento de San Pedro, no Paraguai.

Figura 32.-

Microfotografía, de arenisca del Miembro Superior de la Formación Tacuarembó, mostrando excelente porosidad intergranular, y excelente conexión entre poros (LCV, 2008).

Regionalmente a partir de las zonas de recarga hasta las áreas de descarga el flujo de las aguas subterráneas del SAG presenta una tendencia regional que direcciona el flujo de norte para el sur, acompañando el eje de la Cuenca del Paraná, a partir de la confluencia entre los estados de Paraná y Mato Grosso do Sul (Br) y el territorio paraguayo.

El levantamiento prominente de la porción Este de la cuenca, en su compartimiento Norte, posibilitó la erosión de las secuencias sedimentarias y la formación de zonas de recarga para el acuífero, como puede ser observado en el mapa potenciométrico, con una característica de flujo radial a partir de puntos mas elevados, como por ejemplo, en el extremo nordeste de la faja de afloramientos (Frontera São Paulo y Minas Gerais – BR), Arco de Ponta Grossa (Paraná – BR) y Domo de Lages (Santa Catarina – BR).

Las principales -y más evidentes- áreas de descarga de las aguas del SAG están, de la misma manera que la recarga, asociadas a las fajas de afloramiento. Prácticamente todo el borde oeste del SAG representa un área de descarga importante, alimentando toda la red de drenaje formadora de la Cuenca del río Paraguay, hasta el departamento de San Pedro en territorio paraguayo.

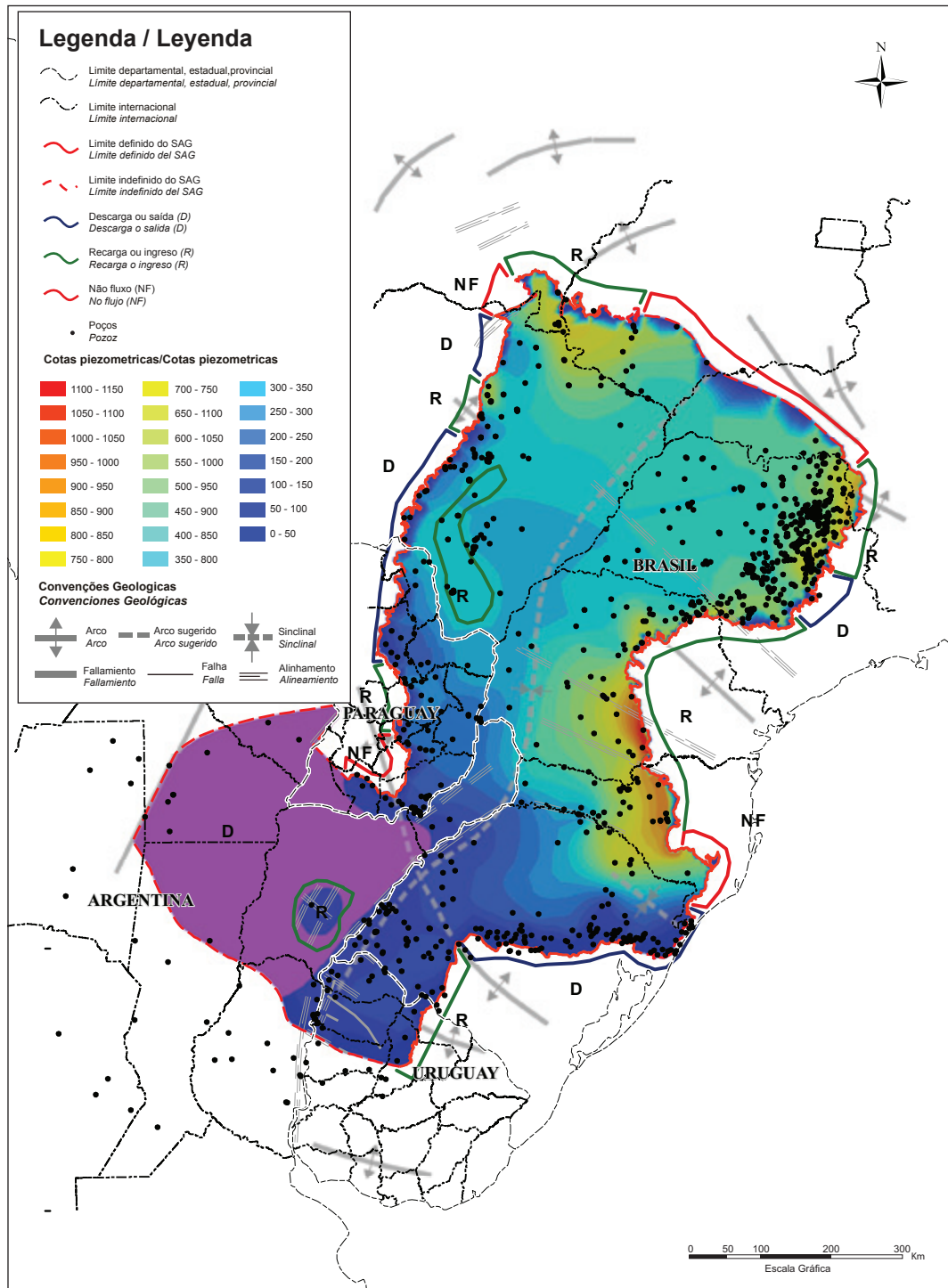


Figura 33.-

Condições de contorno do SAG (LEBAC, 2008). Descarga ou saída (D — azul); recarga ou entrada (R — verde) e condição de não fluxo (NF—vermelho).

Figura 33.-

Condiciones de contorno del SAG (LEBAC, 2008). Descarga o salida (D — azul); recarga o ingreso (R — verde) y condición de no flujo (NF — rojo).

Com relação à caracterização das zonas de recarga e descarga do SAG nas áreas de afloramento, é importante considerar que estas áreas apresentam uma dinâmica própria para o fluxo das águas subterrâneas, independentemente de sua posição topográfica. Em zonas de fluxo local de águas subterrâneas, parte da recarga alimenta o fluxo de base da rede de drenagem existente.

São reconhecidos quatro grandes domínios hidrodinâmicos, os domínios nordeste (NE), leste (E), oeste (W) e sul (S), diretamente relacionados com as grandes estruturas presentes na área de ocorrência do SAG.

O primeiro domínio (domínio – NE) está situado no extremo nordeste da área, abrangendo a porção do aquífero localizada nos Estados de São Paulo e Minas Gerais (Brasil), limitada por uma zona de recarga relacionada à área de afloramentos das unidades litoestratigráficas constituintes do aquífero, com fluxo de águas subterrâneas em direção ao Rio Paraná.

Con relación a la caracterización de las zonas de recarga y descarga del SAG en las fajas de afloramiento, es importante considerar que las mismas presentan una dinámica propia para el flujo de las aguas subterráneas, independientemente de su posición topográfica, a saber: zonas de flujo local de las aguas subterráneas, con parte de la recarga alimentando el flujo de base de la red de drenaje existente.

Son reconocidos cuatro grandes dominios hidrodinámicos, que presentan relaciones directas con las grandes estructuras presentes en el área de ocurrencia del SAG: dominios NE, E, W e S.

El primer dominio (NE) está situado en el extremo nordeste del área, abarcando la región del acuífero localizada en los estados de São Paulo y Minas Gerais (BR), limitada por una zona de recarga relacionada a la porción de afloramientos de las unidades constituyentes del acuífero, con flujo de las aguas subterráneas en dirección al río Paraná.

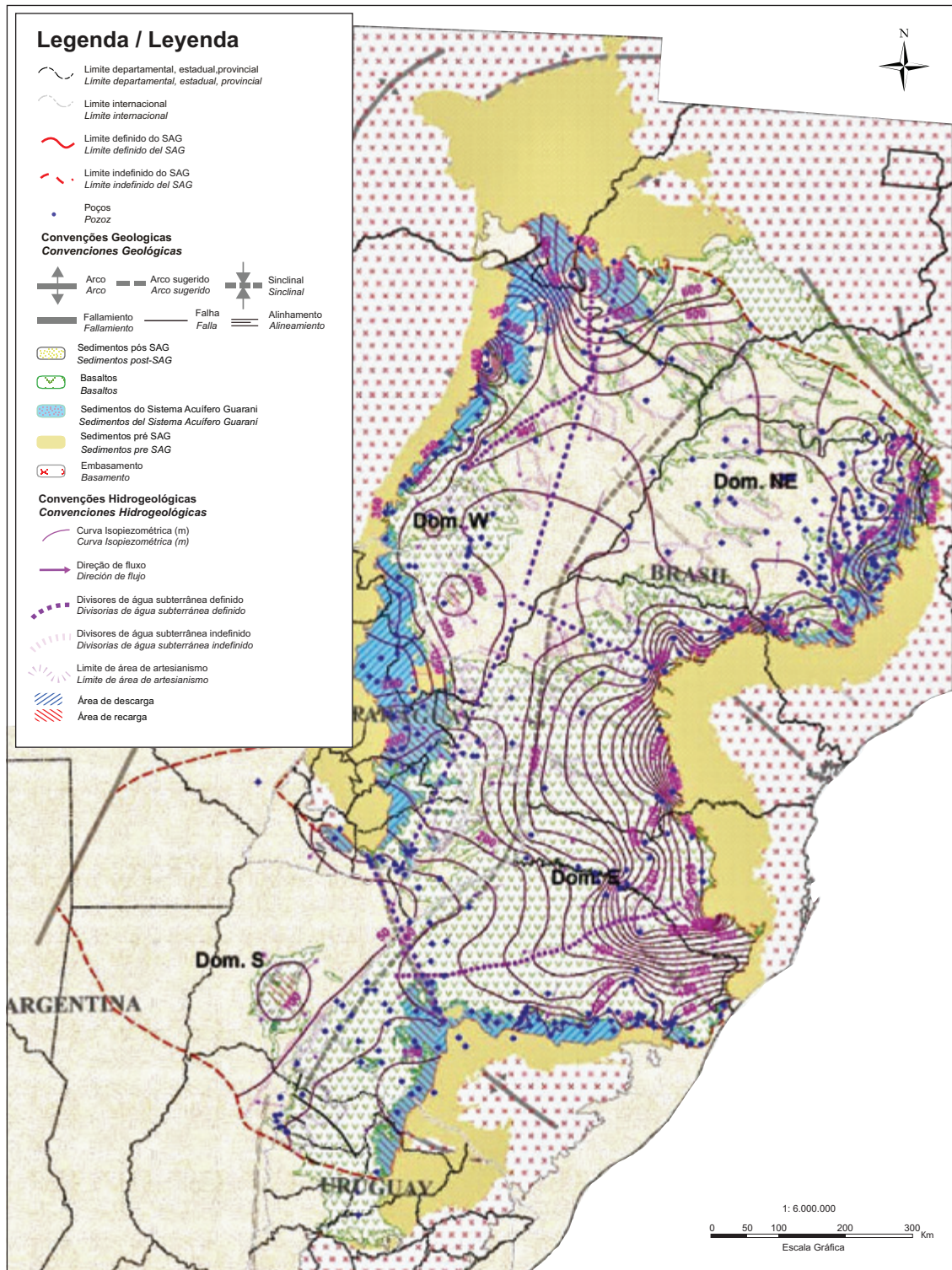


Figura 34.-
Mapa potenciométrico SAG.

Figura 34.-
Mapa potenciométrico SAG.

Na região próxima à zona de afloramentos, os gradientes hidráulicos são maiores, variando de 3 a 5 m/km, com uma considerável redução na zona confinada do aquífero, onde os gradientes não são maiores que 0,1 m/km. Esse fato está diretamente relacionado com a geometria do SAG, já que as partes mais espessas estão nessa região.

Ao sul do domínio nordeste, está localizado o domínio leste. Eles estão separados pelo Arco de Ponta Grossa, cujos diques funcionam como uma grande barreira hidráulica, condicionando o fluxo do domínio em direção ao norte. As águas subterrâneas recarregadas em São Paulo têm que contornar esse obstáculo que se estende até a calha do Rio Paraná.

No domínio leste, o fluxo das águas apresenta direção preferencial leste-oeste, condicionado, principalmente, pela elevação do contorno da Bacia do Paraná e por elementos condicionantes específicos, como no Estado do Paraná, onde o Arco de Ponta Grossa e os diques a ele relacionados funcionam como condicionantes do fluxo, preferencialmente leste-oeste, caracterizando essa região como portadora de grande anisotropia.

Ao sul do Domo de Lages, até a região de Torres, no Rio Grande do Sul, as linhas potenciométricas são paralelas à área de afloramento, caracterizando uma região de não fluxo. Nessa área não ocorre recarga ou descarga do SAG. Este fato é explicado pelas próprias características do terreno, que formam escarpas e paredões, como os da região da Serra do Rio do Rasto, em Santa Catarina. Essa característica impossibilita a entrada de água da chuva no aquífero. Nesse compartimento, os gradientes hidráulicos são bastante homogêneos, variando de 2 a 3 m/km.

Neste domínio está localizada a zona de descarga relacionada com a faixa de afloramentos leste-oeste, que corta o Estado do Rio Grande do Sul e que está localizada na margem Esquerda do Rio Jacuí. Nessa área ocorre a descarga de água proveniente da recarga relacionada aos terrenos mais elevados da região do Domo de Lages.

Toda a borda ocidental oeste do SAG, onde está localizado o domínio oeste, funciona como um sistema praticamente isolado, com áreas de recarga e descarga associadas às faixas de afloramentos que condicionam a existência de um

En la región próxima a la zona de afloramientos, los gradientes hidráulicos son mayores, variando entre 3 y 5 m/km, con una considerable reducción en la zona confinada del aquífero, donde los gradientes no sobrepasan 0.1 m/km. Este hecho presenta relación directa con la geometría del SAG, ya que los mayores espesores son encontrados en esta región.

Al sur del dominio NE está localizado el dominio E, separados por el arco de Ponta Grossa cuyos diques funcionan como una gran barrera hidráulica que condiciona la dirección de flujo del dominio al norte, haciendo que las aguas subterráneas, recargadas en el estado de São Paulo, tengan que contornear esta barrera, que se extiende hasta la "calha" del río Paraná.

En el dominio E, el flujo de las aguas presenta dirección preferencial E-W, condicionado principalmente por el levantamiento de los bordes de la cuenca del Paraná, además de condicionantes específicos, como en el estado de Paraná, donde el Arco de Ponta Grossa y los diques a él relacionados funcionan como condicionante del flujo de dirección preferencial E-W, caracterizando esta región como portadora de gran anisotropía.

Al sur del Domo de Lages, hasta la región de Torres (RS), las líneas potenciométricas son paralelas al área de afloramiento, caracterizando una región de "no flujo", no existiendo ni recarga ni descarga del SAG. Este hecho es explicado por la propia conformación del terreno que forma escarpas y paredones, como en la región de la Serra do Rio do Rasto (SC), imposibilitando la entrada de agua de lluvia en el aquífero. En este compartimento, los gradientes hidráulicos son bastante homogéneos variando entre 2 y 3 m/km.

También en este dominio está localizada la zona de descarga relacionada a la faja de afloramientos con sentido E-W, que corta el estado de Rio Grande do Sul, localizada en la margen izquierda del río Jacuí. En esta área ocurre la descarga del agua proveniente de la recarga relacionada a los terrenos más elevados de la región del Domo de Lages.

Todo el borde oeste del SAG, donde está localizado el dominio W, funciona como un sistema prácticamente aislado, con áreas de recarga y descarga asociadas a las fajas de afloramientos, que condicionan la existencia de un divisor de aguas

divisor de águas subterrâneas. Nesse domínio está localizada outra importante zona de recarga do SAG, associada a terrenos elevados localizados entre os Estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, que também apresenta a característica de fluxo radial. Nesse caso, o fluxo se dirige à zona de afloramentos (Bacia do Rio Taquari-Coxim) e à zona central da Bacia Sedimentar do Paraná.

Toda a faixa oeste de afloramentos do SAG caracteriza-se pela existência de uma zona de descarga relacionada à sua posição topográfica relativamente mais baixa que o resto da bacia, já que o limite oriental foi intensamente elevado, enquanto o limite ocidental, que sofreu influência da orogenia andina, foi levemente elevado.

Associado a essa zona de descarga local do SAG há um divisor de águas subterrâneas paralelo ao divisor de águas superficiais que existe entre as Bacias dos Rios Paraná e Paraguai. Esse divisor é a Serra de Maracajú.

Nas proximidades das cidades de Dourados, Amambaí e Sidrolândia, localizadas no Estado do Mato Grosso do Sul, observa-se a ocorrência de inúmeras janelas de afloramento dos arenitos da Formação Botucatu, em meio aos basaltos, que funcionam como áreas de recarga local e condicionam a existência do divisor. Os gradientes hidráulicos nesse compartimento apresentam valores maiores na porção norte (zona de recarga) e oeste do divisor de águas, variando de 1,5 a 2 m/km. Na porção leste do divisor de águas, os gradientes são menores, variando de 0,8 a 0,5 m/km, também associados à maior espessura do aquífero.

Todo o fluxo regional das águas subterrâneas dos três domínios descritos anteriormente e que não é descarregado na borda ocidental acaba convergindo para o eixo central da bacia, ao longo do Rio Paraná, formando uma zona de convergência de fluxo que acaba conectando a porção norte do SAG ao último domínio, localizado ao sul da Dorsal Assunção-Rio Grande.

A região da Dorsal Assunção-Rio Grande representa, no contexto regional, a zona de conexão das águas subterrâneas provenientes dos três domínios localizados ao norte com aquelas do compartimento sul. Entretanto, ainda não está claro

subterrâneas. En este dominio está localizada otra importante zona de recarga del SAG, asociada a terrenos elevados localizados entre los estados de Goiás, Mato Grosso y Mato Grosso do Sul, que también presenta la característica de flujo radial, en este caso, dirigido para la zona de afloramientos (Bacia do Rio Taquari-Coxim) y para la zona central de la Cuenca Sedimentaria del Paraná.

Toda la faja oeste de afloramientos del SAG esta caracterizada por la existencia de una zona de descarga, relacionada a su posición topográfica relativamente mas baja al resto de la cuenca, ya que el borde oriental fue intensamente levantado, mientras que el borde occidental, que sufrió una pequeña influencia de la orogenia andina, fue poco levantado.

Asociado a esta zona de descarga local del SAG ocurre un divisor de aguas subterrâneas paralelo al divisor de aguas superficiales entre las cuencas de los ríos Paraná y Paraguay, marcado en el relieve por la sierra de Maracajú.

En las proximidades de las ciudades de Dourados, Amambaí e Sidrolândia, todas en el estado de Mato Grosso do Sul, es observada la ocurrencia de innumerables ventanas de afloramiento de las areniscas de la Formación Botucatu, en medio de los basaltos, que funcionan como áreas de recarga locales, condicionando la existencia de este divisor. Los gradientes hidráulicos en este compartimento presentan valores mayores en la porción norte (zona de recarga) y al oeste del divisor de aguas, normalmente entre 1.5 y 2 m/km, mientras en la porción al este del divisor de aguas, estos gradientes son menores, entre 0.8 y 0.5 m/km, también asociados al mayor espesor del acuífero.

Todo el flujo regional de las aguas subterrâneas de los tres dominios descritos anteriormente, y que no son descargados en el borde oeste, acaban convergiendo para el eje central de la cuenca, a lo largo del río Paraná, formando una zona de convergencia de flujo que acaba conectando la porción norte del SAG al último dominio, localizado al sur de la Dorsal Asunción-Río Grande.

La región de la Dorsal Asunción-Río Grande representa, en el contexto regional, la zona de conexión de las aguas subterrâneas provenientes de los tres dominios localizados al norte, con aquellas del compartimento sur. Sin embargo aún no está muy claro el papel de esta área, si es de

se o papel dessa área é de descarga das águas provenientes do norte ou de recarga, misturando as águas já existentes no SAG.

No domínio sul, o fluxo apresenta um sentido preferencial para oeste. As áreas de recarga estão associadas à faixa de afloramento de direção aproximadamente norte-sul, que começa na região de Alegrete, no Rio Grande do Sul, adentra o território uruguaio na região de Rivera e chega até as proximidades da cidade de Tacuarembó, no centro do país.

No território argentino, apesar da pequena quantidade de dados confiáveis, infere-se a existência de uma pequena área de recarga associada ao Alto de Mercedes, na província de Corrientes. A existência de zonas de descarga do aquífero não está claramente evidenciada para o domínio sul, onde o fluxo teria um direcionamento para seus limites (isso deverá ser comprovado no futuro).

É conhecida, ao longo da área do Rio Paraná, uma zona onde o SAG apresenta artesianismo (poços, que após perfuração, são artesianos jorrantes). Esse fenômeno ocorre em uma faixa com largura de cerca de 300 km, localizada nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e no norte do Estado do Paraná, estreitando-se sensivelmente no Sul do território brasileiro e seguindo provavelmente até a província de Corrientes, na Argentina. Uma segunda região de artesianismo também é conhecida na fronteira entre os territórios uruguaio e argentino, ao longo do Rio Uruguai, em uma faixa tem uma largura aproximada de 50 km. Na parte sul do SAG, em território uruguaio, essa faixa é mais larga.

A produtividade do aquífero foi avaliada a partir da análise da capacidade específica dos poços, feita com base nas informações contidas no Banco de Dados Hidrogeológicos do SAG.

Foram encontrados 1.348 poços contendo as informações necessárias para esta avaliação, ou seja, níveis estáticos e dinâmicos e dados de vazão. Os resultados indicam que a maior parte dos poços apresenta vazão inferior a 50 m³/h. Entretanto, há poços com vazão entre 150 e 300 m³/h. Estes poços são utilizados para abastecimento público nas maiores cidades, principalmente no Estado de São Paulo.

descarga de las aguas provenientes del norte, o si apenas es una región de recarga, con mezcla de las aguas ya existentes en el SAG.

En el dominio Sur, el flujo presenta un sentido preferencial hacia el oeste, con áreas de recarga asociadas a la faja de afloramiento, de dirección aproximadamente N-S, a partir de la región de Alegrete (RS), y penetrando en territorio uruguayo en la zona de Rivera y hasta aproximadamente la ciudad de Tacuarembó en el centro del país.

Ya en territorio argentino, a pesar de la pequeña cantidad de datos confiables, se infiere la existencia de una pequeña área de recarga asociada al alto de Mercedes, en la provincia de Corrientes. Para este dominio, no está claramente evidenciada la existencia de zonas de descarga del acuífero; el flujo estaría insinuando un direccionamiento para los límites del mismo (este hecho deberá ser confirmado en un futuro).

Es reconocida, a lo largo del área del río Paraná, una zona donde el SAG presenta artesianismo (condiciones de surgencia natural al perforarse). Este fenómeno ocurre en una faja con largo de cerca de 300 km en los estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul y Paraná (norte del estado), estrechándose sensiblemente en el sur del territorio brasileiro, siguiendo posiblemente hasta la provincia de Corrientes en territorio argentino. Una segunda región de artesianismo es reconocida en la frontera entre los territorios uruguayo y argentino, a lo largo del Río Uruguay, en una faja de ancho del orden de 50 km, con aumento en la porción sur del área de ocurrencia del SAG en territorio uruguayo.

La productividad del acuífero fue evaluada a partir de la consideración de la capacidad específica de los pozos, según las informaciones contenidas en el Banco de Datos Hidrogeológicos del SAG.

Fueron encontrados 1.348 pozos conteniendo las informaciones necesarias para esta evaluación, a saber, niveles estáticos y dinámicos, además de los datos de caudal. Los resultados indican que la mayor parte de los pozos presenta caudales inferiores a 50 m³/h, con pozos que presentan caudales entre 150 y 300 m³/h, siendo éstos los que se utilizan para el abastecimiento público en las mayores ciudades, principalmente en el estado de São Paulo.

Com relação às vazão vazões específicas (vazão dividida pelo rebaixamento no poço), observa-se que a maior parte dos poços apresenta volumes menores a $6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, havendo uma maior concentração de poços com vazões específicas abaixo de $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Aspectos hidroquímicos do SAG

A avaliação detalhada das principais características hidroquímicas e isotópicas do SAG foi realizada com base em amostras de água coletadas durante campanhas de amostragem promovidas durante a execução do projeto. Utilizaram-se também de informações preexistentes.

Neste item serão apresentadas, em linhas gerais, as características das águas do SAG, assim como a avaliação dos parâmetros físico-químicos mais importantes.

Origem da composição química da água do SAG

O modelo conceitual sobre os principais processos responsáveis pela composição das águas do SAG, proposto por vários autores, foi confirmado. Esse modelo engloba as zonas mais estudadas (setor norte do aquífero e, especialmente o Estado de São Paulo, no Brasil). Todavia, os dados produzidos ao longo da execução do Projeto permitiram comprovar que esse modelo é válido para quase todo o aquífero, com algumas particularidades para a zona situada a sudoeste do Arco de Rio Grande–Assunção. Nesta zona, os processos hidrogeoquímicos e os tipos de águas são basicamente os mesmos do norte, mas sua evolução espacial e sua origem são diferentes.

Em todo o aquífero há três tipos básicos de águas (do ponto de vista hidroquímico):

- Tipo A: são águas bicarbonatadas cálcicas (Ca-HCO_3) ou cálcico-magnesianas (CaMg- CO_3), pouco mineralizadas (condutividade elétrica – CE, em geral, inferior a $250 \mu\text{S}/\text{cm}$) e com pH entre 4 e 8. Sua composição se deve à dissolução de CO_2 edáfico (solo) e de carbonatos sólidos do terreno na zona de afloramento.
- Tipo B: são águas bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3), com mineralização baixa – média (CE entre 200 e $600 \mu\text{S}/\text{cm}$) e pH entre 7 e 10. Sua composição se deve, principalmente, ao iônico de Ca e MG, em solução, por Na adsorvido nas superfícies de intercâmbio de troca

Con relación a los caudales específicos (caudal por metro de depresión en el pozo) se observa que la mayor parte de los pozos presentan caudales específicos menores que $6 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, con concentración mayor de pozos con caudales específicos debajo de $2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$.

Aspectos Hidroquímicos del SAG

La evaluación pormenorizada de las principales características hidroquímicas e isotópicas del SAG fue efectuada a partir de la recolección de muestras de agua durante campañas de muestreo realizadas durante la ejecución del proyecto, complementada con información antecedente.

En este ítem serán presentadas las grandes líneas de caracterización de las aguas del SAG, así como la evaluación de los parámetros fisicoquímicos más importantes.

Origen de la composición química del agua del SAG

Se ha confirmado el modelo conceptual ya propuesto por varios autores anteriores en cuanto a los principales procesos responsables de la composición química del agua del SAG en las zonas hasta ahora más estudiadas (sector N del acuífero y, especialmente, el estado de São Paulo en Brasil). No obstante, los datos aportados por la ejecución del Proyecto han permitido comprobar que ese modelo es válido para casi todo el acuífero, con algunas particularidades para la zona situada al SO del Arco de Río Grande–Asunción. En esta última zona los procesos hidrogeoquímicos y los tipos de aguas son básicamente los mismos que en el norte, pero su evolución espacial y su origen son algo distintos.

En todo el acuífero encontramos tres tipos básicos de aguas desde el punto de vista químico:

- Aguas de Tipo A: son bicarbonatadas cálcicas (Ca-HCO_3) o cálcico-magnésicas (CaMg- CO_3), muy poco mineralizadas (Conductividad Eléctrica (CE) en general $<250 \mu\text{S}/\text{cm}$) y con pH entre 4 y 8. Su composición se debe a la disolución de CO_2 edáfico (suelo) y de carbonatos sólidos del terreno en la zona de afloramiento.
- Aguas de Tipo B: son bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3), con mineralización entre baja y media (CE entre 200 y $600 \mu\text{S}/\text{cm}$) y pH entre 7 y 10. Su composición se debe principalmente al intercambio iónico de Ca y Mg en solución por Na adsorbido

iônica das argilas presentes nos arenitos do SAG e, possivelmente, nas formações subjacentes. Essa troca modifica a ordem de abundância dos cátions nas águas da zona de recarga, onde o processo de troca iônica é dominante e a alcalinidade da água aumenta progressivamente.

As águas de tipo B estão divididas em dois subtipos, denominados B1 e B2. As águas do subtipo B1 têm $Cl < SO_4$, e as águas do subtipo B2 têm $Cl > SO_4$. Diferentemente do subtipo B1, as águas do subtipo B2 podem ser encontradas geralmente mais para o centro da bacia, mas é comum encontrar alternâncias ao longo das seções estudadas. Visto que em águas de tipo A sempre se observa $Cl >> SO_4$, a presença de águas com $Cl < SO_4$ implica uma fonte de SO_4 e, visto que nas formações do SAG não há evaporitos nem sulfetos, essa fonte deve estar relacionada a fluxos ascendentes de águas em contato com gessos nas formações do pré-SAG. A proporção de água salina na mistura não precisa ser relevante, bastando 1% ou menos para produzir as mudanças observadas.

A identificação de subtipos em águas do tipo B tipo Na- HCO_3 é uma novidade com relação a estudos anteriores, assim como a informação sobre a existência de misturas com águas de maior salinidade do pré-SAG.

- Tipo C: são águas cuja composição oscila entre bicarbonatadas-sulfatadas-cloretadas sódicas (Na- HCO_3SO_4Cl) e cloretadas-sódicas ou sulfatadas-sódicas. Encontram-se, em geral, nas partes mais internas da bacia. Têm mineralização média e alta (CE entre 500 e 6000 $\mu S/cm$) e pH entre 7 e 9. Sua composição deve-se à mistura das águas de tipo B com outras águas mais profundas de maior salinidade.

As águas de tipo C estão divididas em três subtipos, denominados C1, C2 e C3. As águas do subtipo C1 têm $Cl < SO_4$, ainda que predomine o HCO_3 . As águas

en las superficies de intercambio de las arcillas presentes en las areniscas del SAG (y posiblemente también en las de formaciones infrayacentes). El intercambio modifica el orden de abundancia de los cationes en las aguas de la zona de recarga. La alcalinidad del agua aumenta progresivamente en toda la zona en la que el proceso de intercambio iónico es dominante.

Las aguas de Tipo B se distribuyen en dos grupos, denominados aquí B1 y B2. Las aguas de subtipo B1 tienen $Cl < SO_4$ y las aguas del subtipo B2 tienen $Cl > SO_4$. Las segundas se suelen encontrar más hacia el centro de la cuenca que las primeras, pero es frecuente encontrar alternancias a lo largo de las transectas estudiadas. Puesto que en las aguas de Tipo A siempre es $Cl >> SO_4$, la presencia de aguas con $SO_4 > Cl$ implica una fuente de SO_4 , y dado que en las formaciones del SAG no hay evaporitas ni sulfuros, esa fuente debe estar en flujos ascendentes de aguas en contacto con yesos en las formaciones del pre-SAG. La proporción de agua salina en la mezcla no tiene por que ser relevante, basta con un 1% e incluso menos para producir los cambios observados.

Esta identificación de "subtipos" en las aguas de tipo Na- HCO_3 es una novedad respecto a estudios anteriores, al igual que la información que aportan acerca de la existencia de mezclas con aguas más salinas del pre-SAG.

- *Aguas de Tipo C: su composición oscila entre bicarbonatadas-sulfatadas-cloruradas sódicas (Na- HCO_3SO_4Cl) y cloruradas-sódicas o sulfatadas-sódicas. En general se encuentran en las partes más internas de la cuenca. Tienen mineralización entre media y alta (CE entre 500 y 6000 $\mu S/cm$) y pH entre 7 y 9. Su composición se debe a la mezcla de las aguas de tipo B con otras aguas más salinas de procedencia profunda.*

Las aguas de Tipo C se distribuyen en tres grupos, denominados aquí C1, C2 y C3. Las aguas de subtipo C1 tienen $Cl < SO_4$

do subtipo C2 têm $\text{Cl} > \text{SO}_4$, ainda que também predomine o HCO_3 . As águas do subtipo C3 são do tipo Na-Cl ou Na- SO_4 . As águas do subtipo C3 são as mais salinas de todas e costumam ser encontradas no centro da bacia, nos Estados de São Paulo, Santa Catarina ou ao longo do Rio Paraná, entre o Paraguai, a Argentina e o Brasil. Segundo o cálculo realizado, bastaria 5% ou menos de água com salinidade semelhante à da água do mar para produzir as águas mais salinas encontradas. Além disso, basta uma pequena quantidade de água salobra para modificar significativamente a composição da água do SAG e para modificar os equilíbrios químicos, favorecendo processos de intercâmbio iônico e precipitação de carbonatos.

O flúor (F) está associado a águas mais salinas, termais e com relação $r\text{Na}/r\text{Cl}$ ($r=\text{meq/L}$), mais próxima a 1, o que sugere que a fonte de flúor (pelo menos a principal) está nas formações salinas do pré-SAG.

Essa informação é relevante do ponto de vista científico para explicar a origem da distribuição espacial da composição química das águas do SAG, contrapor o modelo conceitual sobre a rede do fluxo (a existência de misturas com águas salinas profundas significa que há zonas onde predominam os fluxos verticais diante dos horizontais) e estabelecer as correções que devem ser realizadas na hora de calcular a idade da água com ^{14}C .

Com relação às águas da região termal da Argentina, nos poços que extraem águas salgadas, as razões isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ indicam que estas águas têm origem distinta das águas do SAG presentes nos poços termais que extraem água doce.

Do ponto de vista prático da gestão do aquífero, é importante conhecer os processos característicos que ocorrem nas zonas de mistura de águas doces e salinas. Isso permite prever a evolução que terá a composição da água em casos de exploração de zonas do aquífero onde existe equilíbrio entre águas doces e salinas.

aunque domina el HCO_3 , las aguas del subtipo C2 tienen $\text{Cl} > \text{SO}_4$, aunque domina también el HCO_3 y las aguas del subtipo C3 son de tipo Na-Cl o bien Na- SO_4 . Las aguas de tipo C3 son las más salinas de todas las encontradas, y aparecen hacia el centro de la cuenca en los estados de São Paulo, Santa Catarina o lo largo del río Paraná entre Paraguay, Argentina y Brasil. Según el cálculo realizado, bastaría con algo menos de un 5% de agua con una salinidad similar a la marina para producir las aguas más salinas encontradas. Además, una pequeña proporción de agua salina basta para modificar significativamente la composición del agua del SAG y para modificar los equilibrios químicos, favoreciendo procesos de intercambio iónico y precipitación de carbonatos.

El flúor está asociado a las aguas más salinas, calientes y con una relación $r\text{Na}/r\text{Cl}$ ($r=\text{meq/L}$) más cercana a 1, lo que sugiere que la fuente de F (al menos la principal) está en las formaciones salinas del pre-SAG.

Esto es relevante, no solo desde el punto de vista científico, para explicar el origen de la distribución espacial de la composición química del agua del SAG, contristar el modelo conceptual sobre la red de flujo (la existencia de mezclas con aguas salinas profundas significa que hay zonas donde dominan los flujos verticales frente a los horizontales) y establecer las correcciones que se deben realizar a la hora de calcular la edad del agua con ^{14}C .

Con relación a las aguas de la región termal de argentina, en los pozos que extraen agua salada, las razones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ indican que estas aguas tienen origen distinto que las aguas del SAG presentes en los pozos termales que extraen agua dulce del SAG.

Desde el punto de vista práctico de la gestión del acuífero, es muy útil conocer los procesos característicos que tienen lugar en las zonas de mezcla entre agua dulce y agua salina: permite prever la evolución que tendrá la composición del agua en caso de poner en explotación zonas del acuífero donde existen aguas salinas en equilibrio con aguas dulces.

Distribuição espacial da composição química das águas do SAG e sua relação com a rede de fluxo e com a estrutura geológica

Os mapas de Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Na, Cl e SO_4 mostram que a distribuição espacial dos solutos é fortemente influenciada por dois fatores principais:

1. A existência de fluxos ascendentes de águas salinas do pré-SAG. Destaque para as zonas situadas no limite leste do Paraguai com o Brasil e com a Argentina, ao longo do Rio Paraná e no limite entre os estados brasileiros do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, ao longo do Rio Pelotas (figura 35). Também é clara a existência de fluxos ascendentes de águas salinas nos estados brasileiro do Paraná e em Pelotas, no centro da bacia. A existência de fluxos ascendentes e de descargas nos Rios Iguaçu e Pelotas já foi estudada em trabalhos anteriores (DE SOUZA, 2004; MACHADO, 2005).
2. A existência do arco estrutural do Rio Grande-Assunção. Todos os mapas de distribuição espacial de solutos indicam que o arco é um patamar entre as sub-bacias norte e sul. Incluindo o fato de as águas subterrâneas do entorno de Uruguiana e Itaquí não se parecem com as águas da zona imediatamente ao norte. Esse fato sugere que o fluxo entre as sub-bacias norte e sul é mínimo ou nulo.

Portanto, não parece existir descarga do SAG, em seu limite sudoeste, por transferência lateral em direção a outras formações. Boa parte da descarga parece ocorrer na rede hídrica superficial por meio de fluxos ascendentes em zonas intensamente fraturadas. A distribuição dos gradientes de Sólidos Totais Dissolvidos (figura 35), Na, Cl, SO_4 , entre outros, mostra que pelo menos ocorre descarga regional nos Rios Iguaçu, Uruguai, Pelotas e Paraná.

Distribución espacial de la composición química del agua del SAG y su relación con la red de flujo y con la estructura geológica

Los mapas de contenidos en Sólidos Disueltos Totales, Na, Cl y SO_4 muestran que la distribución espacial de los solutos está fuertemente condicionada por dos factores principales:

1. La existencia de flujos ascendentes de aguas salinas del pre-SAG. Destacan las zonas situadas en el límite E de Paraguay con Brasil y con Argentina, a lo largo del río Paraná, y el límite entre los estados brasileños de Rio Grande do Sul y Santa Catarina, a lo largo del río Pelotas (Figura 35). Pero también es clara la existencia de flujos ascendentes de agua salina en los estados de Paraná y Pelotas, hacia el centro de la cuenca. La existencia de flujos ascendentes y de descargas a los ríos Iguazú y Pelotas se conoce también por trabajos anteriores (De Souza, 2004; Machado, 2005).
2. La existencia del arco estructural de Río Grande-Asunción. Todos los mapas de distribución espacial de solutos indican que el arco supone un umbral entre la subcuenca N y la subcuenca S. Incluso las aguas subterráneas del entorno de Uruguiana e Itaquí no se parecen a las de la zona inmediatamente al N. Esto sugiere que el flujo entre la subcuenca N y la S es mínimo o incluso nulo.

Por tanto, no parece existir descarga del SAG por su límite SO por transferencia lateral hacia otras formaciones. Buena parte de la descarga parece ocurrir a la red hídrica superficial a través de flujos ascendentes en zonas de intensa fracturación. La distribución de los gradientes de sólidos disueltos totales (Figura 35), Na, Cl, SO_4 , etc. muestra que al menos se produce descarga regional a los ríos Iguazú, Uruguay, Pelotas y Paraná.

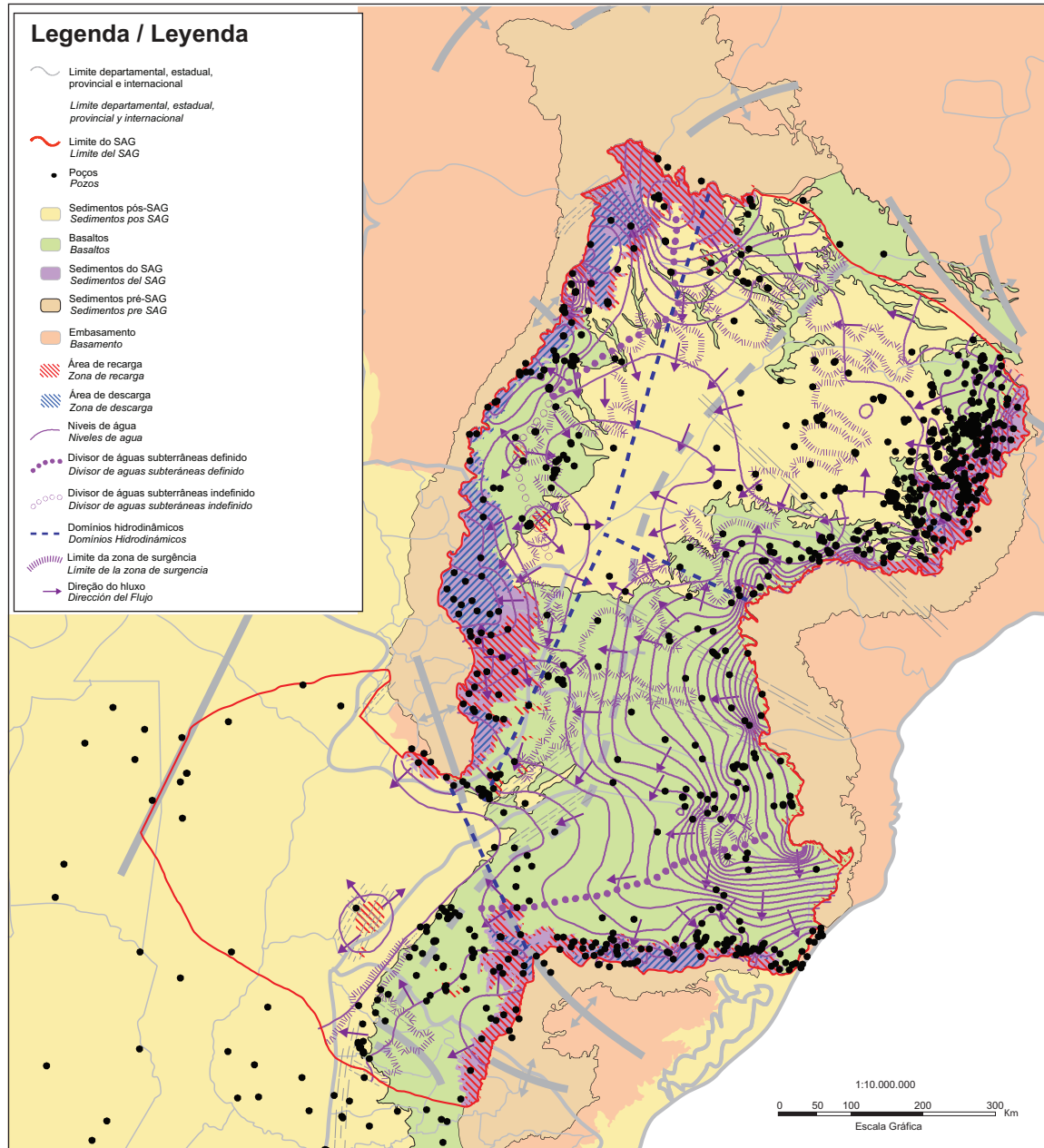


Figura 35.-

Principais zonas de descarga regional de águas subterrâneas do SAG e do pré-SAG inferidas com base na hidroquímica e principais estruturas regionais (arcos e falhas) que parecem ter um papel relevante na distribuição espacial da composição química da água.

Figura 35.-

Principales zonas de descarga regional de agua subterranea del SAG y del pre-SAG deducidas de la hidroquímica y principales rasgos estructurales regionales (arcos y fallas) que parecen jugar un papel relevante en la distribución espacial de la composición química del agua.

Do ponto de vista hidroquímico, considerando sempre a escala de trabalho e as simplificações inerentes, são reconhecidas quatro zonas SAG (figura 36).

- Zona I (Tipo A): caracterizada pela presença de águas principalmente bicarbonatadas cálcica e, subordinadamente, bicarbonatadas cálcico-magnesianas e cálcico-sódicas, com pouca mineralização, que se evidencia nas baixas condutividades elétricas observadas. Esta zona está localizada próxima da faixa de afloramentos, contornando a zona de confinamento do SAG. Apresenta larguras variáveis, sendo mais estreita na região leste. Na região oeste, principalmente no Estado do Mato Grosso do Sul (Brasil), chega a alcançar cerca de 150 km.
- Zona II (Tipo B): caracterizada pela presença predominante de águas bicarbonatadas sódicas. Nesta zona, o aquífero já apresenta características de confinamento, com maior grau de mineralização, que se evidencia nas condutividades elétricas médias observadas. Nesta zona há uma subzona localizada ao longo do Rio Uruguai, entre os territórios da Argentina e do Uruguai, onde as águas são caracterizadas pela presença de cloreto na sua composição.
- Zona III (Tipo C): caracterizada pela presença predominante de águas sulfatadas cloretadas sódicas e, subordinadamente, com presença de bicarbonato. Estas águas são altamente mineralizadas, o que se evidencia nas altas condutividades elétricas observadas. Esta zona coincide com a “calha” central da Bacia do Paraná.
- Zona IV: esta zona foi caracterizada por meio de observações indiretas em perfis elétricos de poços de petróleo perfurados nas províncias de Entre Rios, Chaco, Formosa e Santiago del Estero, na Argentina. Suas águas são, possivelmente, cloretadas sódicas, com alta mineralização, o que determina a baixa resistividade elétrica observada nos perfis geofísicos ($< 2\Omega m$), permitindo estimar condutividades elétricas superiores a $10.000 \mu S/cm$.

Desde el punto de vista hidroquímico, considerando siempre la escala de trabajo y las simplificaciones inherentes, son reconocidas cuatro principales zonas hidroquímicas para el SAG (Figura 36).

- *Zona I (Tipo A): caracterizada por la presencia de aguas principalmente Bicarbonatadas cálcicas, y subordinadamente aguas Bicarbonatadas Calco-magnésicas y Calco-sódicas, con poca mineralización, reflejada principalmente en las bajas conductividades eléctricas observadas. Esta zona está localizada próxima a la faja de afloramientos contorneando la zona de confinamiento del SAG. Presenta anchos variables, siendo mas estrecha en la región este, pudiendo alcanzar cerca de 150 km en la región oeste, principalmente en el estado de Mato Grosso do Sul (Br).*
- *Zona II (Tipo B): caracterizada por la presencia de aguas principalmente Bicarbonatadas sódicas, donde el acuífero ya se presenta más confinado, con mayor grado de mineralización, reflejado principalmente en las conductividades eléctricas medias observadas. Esta zona presenta una sub-zona localizada a lo largo del río Uruguay, entre los territorios de Argentina y Uruguay, donde las aguas son caracterizadas por la presencia del anión cloruro en su composición.*
- *Zona III (Tipo C): caracterizada por la presencia de aguas principalmente Sulfatadas cloruradas sódicas, subordinadamente con presencia de bicarbonato, altamente mineralizadas, lo que se refleja principalmente en las altas conductividades eléctricas observadas. Esta zona es coincidente con la “calha” central de la cuenca del Paraná.*
- *Zona IV: Esta zona fue caracterizada por medio de observaciones indirectas, en perfiles eléctricos de pozos de petróleo perforados en las provincias de Entre Ríos, Chaco, Formosa y Santiago del Estero (Ar). Son posiblemente aguas Cloruradas Sódicas, con alta mineralización, lo que determina la baja resistividad eléctrica observada en los perfiles geofísicos ($< 2\Omega m$), permitiendo estimar conductividades eléctricas superiores a $10.000 \mu S/cm$.*

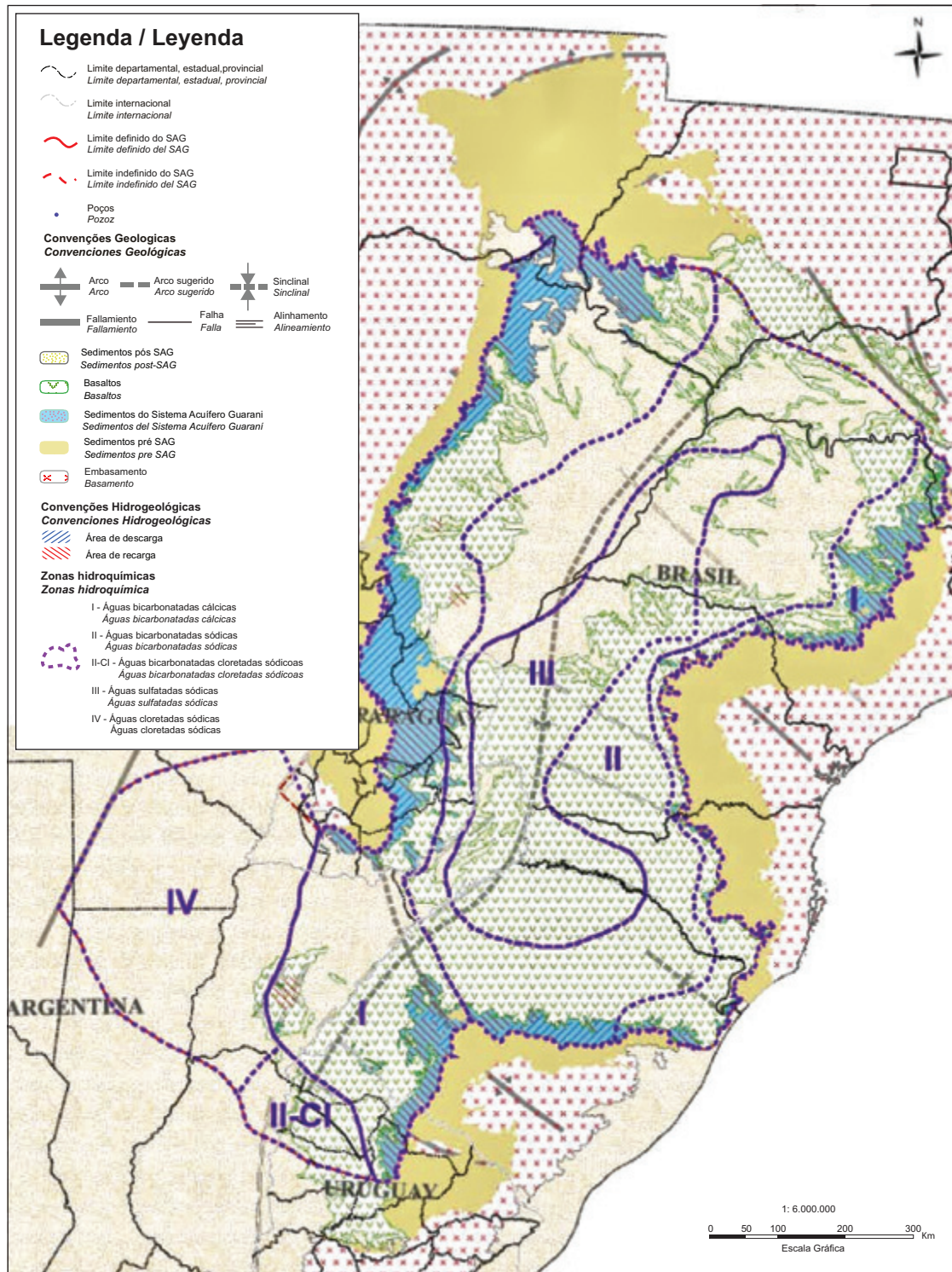


Figura 36.-
Mapa de zonas hidroquímicas.

Figura 36.-
Mapa de zonas hidroquímicas.

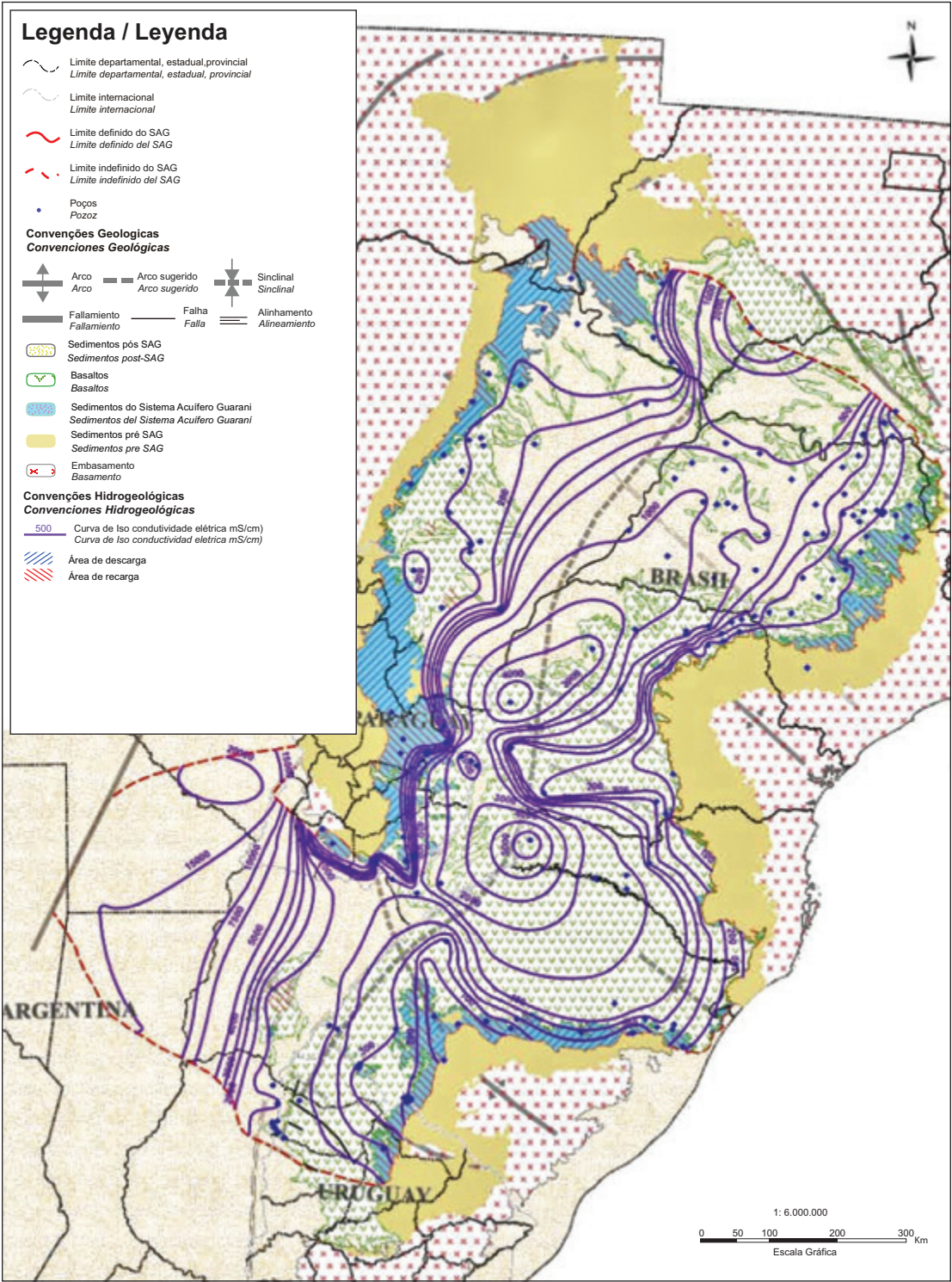


Figura 37.-
Mapa de condutividade elétrica.

Figura 37.-
Mapa de conductividad eléctrica.

Nas proximidades da área de recarga, localizada no território paraguaio, observa-se um gradiente muito elevado das condutividades elétricas em direção ao Rio Paraná. Talvez isso esteja relacionado com a diminuição da espessura do SAG nessa região e com a possibilidade de que os poços estejam captando águas do aquífero inferior.

Na porção ocidental do SAG, no território argentino, as águas apresentam alta salinidade. Isso foi estimado com base nos perfis elétricos realizados em poços de prospecção de petróleo.

Isótopos ambientais no estudo das águas do SAG

Isótopos são átomos, variantes de um elemento químico, que têm o mesmo número atômico (número de prótons), mas possuem massas atômicas distintas (diferentes números de nêutrons em seus núcleos). Podem ser naturais ou artificiais. A relação entre as concentrações dos isótopos é expressa em “partes por mil” (‰) ou “desvio por mil” de um padrão (‰).

Os isótopos radioativos, como o trítio (^3H ^{14}C), vão perdendo constantemente sua radioatividade a partir do momento de formação das rochas e se desintegram de forma irreversível. A velocidade de desintegração, que é constante, varia de acordo com o elemento. O período de semidesintegração (vida média) é o tempo necessário para que um elemento reduza sua massa radioativa pela metade. Em função dessa característica (vida média), os isótopos radioativos permitem determinar a idade das rochas ou das águas que contenham os elementos em questão.

Os isótopos radioativos, como o trítio (^3H) e o carbono quatorze (^{14}C), vão reduzindo constantemente sua radioatividade a partir do momento de formação das rochas e se desintegram de forma irreversível. A velocidade de desintegração é constante e tem valor característico para cada elemento. O período de meia vida é o tempo necessário para que um elemento reduza sua massa radioativa pela metade. Em função dessa característica (meia vida), os isótopos radioativos permitem determinar a idade das rochas ou das águas que contenham os elementos em questão.

Próximo al área de recarga localizada en territorio paraguay, se observa un gradiente muy elevado de las conductividades eléctricas en dirección al río Paraná, tal vez relacionado a la disminución de los espesores del SAG en esta área, y la posibilidad de los pozos de estar captando aguas del acuífero inferior.

En la porción occidental del SAG, en territorio argentino, las aguas presentan altas salinidades, inferidas a partir de perfiles eléctricos realizados en pozos para la prospección petrolífera.

Isótopos ambientales en el estudio de las aguas del SAG

Isótopos: son átomos, variantes de un elemento químico, que tienen el mismo número atómico (número de protones) pero tienen distinta masa atómica (difieren en el número de neutrones de su núcleo); tienen origen natural o artificial. La relación entre las concentraciones de los isótopos se expresa en por mil (‰) o desviación en por mil respecto a un patrón (‰).

Isótopos radiactivos (Ej: ^3H (tritio), ^{14}C): van reduciendo su radiactividad de forma constante a partir del momento de la formación de las rocas y se desintegran irreversiblemente: la velocidad de desintegración es constante y tiene valor característico para cada elemento; el periodo de semidesintegración (vida media) es el tiempo necesario para que un elemento reduzca su masa radiactiva a la mitad. En función de esta característica (vida media), los isótopos radiactivos permiten determinar la edad de las rocas o aguas que contienen los elementos en cuestión.

Isótopos estables (Ej: ^{18}O , ^2H (deuterio), ^{13}C): no se desintegran y todo el tiempo de su presencia en las aguas tienen el mismo contenido. Este contenido depende de varios factores y procesos como: la historia del agua, condiciones de las precipitaciones, factores geográficos (distancia al océano, altitud, latitud), factores climáticos (temperatura, grado de condensación de la masa nubosa), procesos de precipitación, de evaporación, procesos geotermiales, metamórficos y actividad humana; en función de ello, los isótopos estables permiten determinar el origen de las aguas.

Isótopos estáveis ^{18}O e ^2H

Zona norte

Observou-se uma ampla faixa de valores isotópicos nas águas subterrâneas da zona norte do SAG. Os conteúdos isotópicos de todas as águas subterrâneas se agrupam em uma linha meteórica que é muito parecida à linha meteórica mundial. Isso indica que as águas não sofreram um processo importante de evaporação antes da infiltração nas áreas de recarga. A ampla faixa de valores isotópicos observados na zona norte é determinada principalmente pelos valores isotópicos obtidos nos setores de São Paulo e Paraná, onde os valores mais enriquecidos tendem a estar próximos às zonas de recarga e os valores mais empobrecidos, próximos às partes confinadas e mais profundas do aquífero. No Mato Grosso do Sul, com exceção de um caso, os valores isotópicos estão dentro de uma faixa muito mais estreita.

Zona sul

Na zona sul do SAG, a faixa de valores isotópicos das águas subterrâneas é muito menor que aquela observada na zona norte.

Estas águas agrupam-se ao longo de uma linha meteórica um pouco diferente que a linha meteórica mundial, o que pode estar relacionado com a história das massas de ar que trazem as precipitações a essa região.

Enxofre ^{34}S

Zona norte

A concentração de sulfato nas amostras analisadas neste estudo varia entre 5,7 e 127,4 mg/L, com exceção do poço profundo Foz do Iguaçu, localizado nas proximidades do Rio Paraná, onde a concentração de sulfato é de 927 mg/L. Não foi observada nenhuma relação entre o conteúdo de $\delta^{34}\text{S}$ e a concentração de sulfatos.

Zona sul

Na zona sul, a concentração de sulfatos é, em geral, muito maior do que na zona norte, variando entre 12 e 190 mg/L. Tampouco neste caso foi observada uma relação entre a concentração de sulfatos e o valor do $\delta^{34}\text{S}$.

Trítio (^3H)

Os valores mais altos se encontram nas zonas de recarga em águas bombeadas das formações subjacentes ao SAG (pré-SAG). Isso significa que são águas recentemente recarregadas no aquífero. Observa-se um comportamento

Isótopos Estables ^{18}O y ^2H

Zona Norte.

Se observó un amplio rango de valores isotópicos en las aguas subterráneas de la zona Norte. Los contenidos isotópicos de todas las aguas subterráneas se agrupan en una línea meteórica que es muy parecida a la línea meteórica mundial. Esto indica que las aguas no han sufrido un proceso importante de evaporación antes de la infiltración en las zonas de recarga. El amplio rango de valores isotópicos observados en la zona Norte básicamente está determinado por los valores isotópicos obtenidos en los sectores de Sao Paulo y Paraná, donde los valores más enriquecidos tienden a estar cercanos a las zonas de recarga y los valores más empobrecidos se encuentran en la parte confinada y más profunda del acuífero. En el caso de Mato Grosso do Sul, con la excepción de un valor, los valores isotópicos están dentro de un rango mucho más pequeño.

Zona Sur.

El rango de valores isotópicos de las aguas subterráneas en la zona Sur es mucho menor que el rango de valores isotópicos observados en la zona Norte del área del SAG.

Estas aguas se agrupan a lo largo de una línea meteórica un poco diferente que la línea meteórica mundial, lo cual posiblemente esté relacionado con la historia de las masas de aires que traen las precipitaciones a esta región.

Azufre ^{34}S

Zona Norte.

La concentración de sulfato en las muestras analizadas este estudio varía entre 5,7 y 127,4 mg/L, con la excepción es el pozo profundo Foz de Iguazú, localizado cerca del Rio Paraná, que tiene una concentración de 927 mg/L de sulfato. No se observó ninguna relación entre el contenido de $\delta^{34}\text{S}$ y la concentración de sulfatos.

Zona Sur.

En esta zona en general los valores de concentración de sulfatos son mucho mayores que en la zona Norte, variando entre 12 y 190 mg/L. Tampoco en este caso se observa una relación entre la concentración de sulfatos y el valor del $\delta^{34}\text{S}$.

Trítio (^3H)

Los valores más altos se encuentran en las zonas de recarga y en aguas bombeadas de la formación que subyace al SAG (denominada PRE-SAG) implicando que son aguas que se han recargado al acuífero recientemente. Un comportamiento

semelhante nos dados coletados de trítio obtidos na zona sul.

*Isótopos do carbono
Dados de ^{13}C
Zona norte*

O comportamento geral observado nesses dados revela que os valores mais empobrecidos (mais negativos) de $\delta^{13}\text{C}$ estão nas áreas de recarga. As águas subterrâneas vão se enriquecendo em $\delta^{13}\text{C}$ ao longo do sistema de fluxo em direção ao centro do aquífero.

Zona sul

Assim como na zona norte, os valores mais empobrecidos estão nas proximidades das zonas de recarga.

*Dados de ^{14}C
Zona norte*

Os valores mais altos, que representam águas modernas, estão nas proximidades das zonas de recarga do sistema de fluxo. Este comportamento é revelado pelo mapa de distribuição espacial dos valores de ^{14}C na área de estudo. Os valores mais baixos, que representam as águas mais antigas, tendem a estar na porção central do aquífero e correspondem às amostras coletadas nas partes mais profundas.

Na região de São Paulo, os valores de idades corrigidos por meio do método carbono – 13 variam entre águas modernas até águas de 28.000 anos de idade.

No caso da região do Mato Grosso do Sul, as águas mais antigas caracterizam-se por idades de ^{14}C corrigidas entre 6.000 e 25.000 anos. É importante destacar que há uma grande área próxima ao Rio Paraná na qual não há poços que correspondam às porções mais profundas do aquífero.

Na região do Paraná, assim como nas outras regiões, os valores mais altos correspondem a águas modernas coletadas nas zonas de recarga. Os valores mais baixos correspondem a águas antigas coletadas em poços afastados da zona de recarga. As águas mais antigas, de acordo com o método do ^{14}C , apresentam uma faixa de idades corrigidas compreendida entre 4.000 e 28.000 anos. A região do Paraná não está bem representada pela análise ^{14}C , pois há uma grande área próxima ao Rio Paraná onde não há poços acessíveis para a coleta de amostras.

similar se observa con los datos de tritio obtenidos en la zona Sur.

*Isótopos del Carbono
Datos de ^{13}C
Zona Norte*

El comportamiento general que se observa en estos datos es que los valores más empobrecidos (mas negativos) de $\delta^{13}\text{C}$ se encuentran en las áreas de recarga y luego las aguas subterráneas se van enriqueciendo en $\delta^{13}\text{C}$ a lo largo del sistema de flujo hacia el centro del acuífero.

Zona Sur

De forma similar a lo observado en la zona Norte, los valores mas empobrecidos se encuentran en las zonas cercanas a las áreas de recarga.

*Datos de ^{14}C
Zona Norte*

Los valores más altos que representan aguas modernas deberían estar en las zonas que de acuerdo al sistema de flujo representan las áreas de recarga. Este comportamiento se ve confirmado en el mapa que muestra la distribución espacial de los valores de ^{14}C en el área de estudio. Los valores más bajos que representan las aguas más viejas tienden a estar en la parte central y corresponden a muestras tomadas en la parte más profunda del acuífero.

En la región de Sao Paulo, los valores de edades corregidos usando el método de carbono-13, varían entre aguas modernas hasta aguas con edades de 28,000 años.

En el caso de la región de Mato Grosso do Sul Las aguas más viejas se caracterizan por edades de carbono-14 corregidas entre 6.000 a 25.000 años. Es importante mencionar la ausencia de pozos en una gran área cercana al Rio Paraná y que corresponde a la parte más profunda del acuífero.

En la región de Paraná, al igual que las otras regiones, los valores más altos corresponden a aguas modernas muestreadas en las zonas de recarga, mientras que los valores más bajos, que corresponden a las aguas más antiguas, fueron obtenidos en pozos alejados de la zona de recarga. Las aguas más antiguas, de acuerdo al método de carbono-14, presentan un rango de edades corregidas comprendido entre 4.000 a 28.000 años. La región de Paraná no está muy bien representada en cuanto a análisis de ^{14}C , ya que hay una gran área cercana al Rio Paraná en la que no hay pozos que sean accesibles para ser muestreados.

Zona sul

Nas regiões de Santa Catarina, os valores mais altos correspondem a águas localizadas em áreas de recarga. As águas mais antigas têm idades de radiocarbono corrigidas e compreendidas entre 13.900 e 38.000 anos. Já na região do Rio Grande do Sul, os valores de ^{14}C correspondem a idades radiocarbono corrigidas entre águas de modernas águas com 11.500 anos. Na região do Uruguai, os valores de ^{14}C correspondem a idades corrigidas compreendidas entre 16.000 e 28.000 anos.

Monitoramento isotópico durante testes de bombeamento

Três amostras foram coletadas durante os ensaios de bombeamento nos poços termais de Salto e Concórdia. Não se observaram mudanças significativas, causadas pelo bombeamento, na composição isotópica dessas águas.

Águas superficiais

Nas lagoas de Ibera, Galaza e Luna, que formam parte das zonas úmidas dos Esteros de Ibera, foram coletados um número seletivo de amostras, correspondendo a uma superficial e uma a cerca de 2 metros de profundidade.

Essas amostragens foram feitas para confirmar a hipótese de que as zonas úmidas seriam zonas de descarga do Aquífero Guarani. Os dados isotópicos mostraram que as águas das lagoas têm uma composição isotópica homogênea. São águas que se caracterizam por valores muito enriquecidos em ^{18}O e ^2H , o que é típico de águas afetadas pela evaporação. Os dados de trítio indicam que essas águas têm origem recente e não mostram nenhuma evidência de descarga de águas antigas nas zonas úmidas.

Zona Sur

En las regiones de Santa Catarina, los valores más altos corresponden a aguas localizadas en las áreas de recarga. Las aguas más antiguas, corresponden a edades de radiocarbono corregidas comprendidas entre 13.900 a 38.000 años. La región de Rio Grande do Sul mostró valores de C-14 que corresponden a edades de radiocarbono corregidas entre aguas modernas y 11.500 años. En la región de Uruguay, los valores de C-14 corresponden a edades corregidas de C-14 entre 16.000 y 28.000 años.

Monitoreo isotópico durante pruebas de bombeo

Tres muestras fueron colectadas durante las pruebas de bombeo en los pozos, termales de Salto-Concordia; no se observaron cambios significativos derivados del bombeo, en la composición isotópica de estas aguas.

Aguas Superficiales

Un número selecto de muestras, correspondiendo a una muestra superficial y a una cerca del fondo de la laguna a una profundidad de dos metros, fueron colectadas en las Lagunas de Ibera, Galarza y Luna que son parte de los humedales de los Esteros de Ibera. Este muestreo se realizó para responder a una hipótesis que los humedales serían zonas de descarga del acuífero Guaraní. Los datos isotópicos mostraron una composición isotópica homogénea en las aguas de las lagunas. Estas aguas se caracterizan por valores muy enriquecidos en ^{18}O y ^2H , lo cual es típico de aguas que han sido afectadas por evaporación. Los datos de tritio indican que estas aguas son aguas de origen reciente y no muestran ninguna evidencia de descarga de agua antiguas a los humedales.

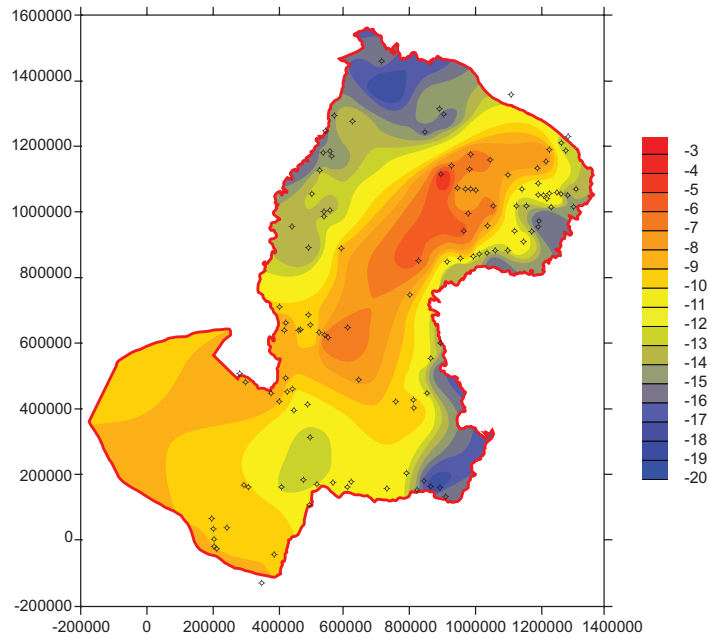


Figura 38.-
Distribuição de ^{13}C .

Figura 38.-
Distribución de ^{13}C .

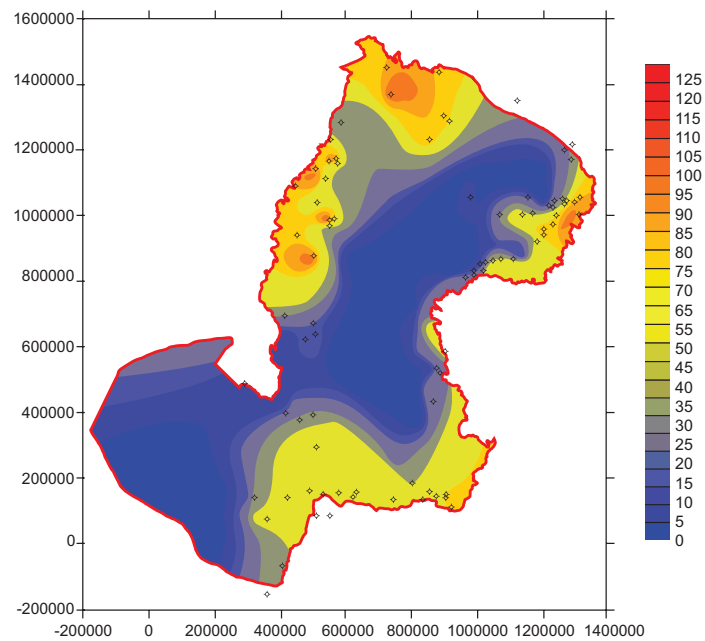


Figura 39.-
Distribuição de ^{14}C .

Figura 39.-
Distribución de ^{14}C .

Microalgas (termas)

As algas são organismos capazes de adaptar-se a ambientes muito diferentes. Podem sobreviver até mesmo em meios com altas temperaturas e acidez. Várias espécies já foram encontradas em fontes de mananciais termais no mundo, caracterizados por elevadas temperaturas.

A maioria das algas de água doce é microscópica (microalgas), mas muitas classes são gregárias e podem formar grandes colônias, superpopulações conhecidas como proliferação de algas que podem ser vistas a olho nu em lagos e reservatórios. As microalgas são indivíduos que podem ser unicelulares ou pluricelulares e suas células funcionam de forma independente, realizando todas as funções vitais.

Em Concórdia e no Uruguai, as algas foram encontradas apenas nas primeiras amostras coletadas. As amostragens foram realizadas nas Termas de Vertiente, em Concórdia, e nas Termas de Daymán e Club Remeros, em Salto, no dia 27 de março de 2007.

A densidade de algas revelada pelas amostras de água é baixa se comparada à densidade encontrada em ambientes úmidos nos quais estas se desenvolvem. Essa densidade é muito menor do que a altíssima densidade que a Secretaria de Turismo da província de Entre Ríos havia atribuído às águas das Termas de Vertiente em Concórdia. Os testes mostraram valores médios de cianobactérias de aproximadamente 51.870.000 algas/L e de diatomáceas, da ordem de 650.000 algas/L. Essa concentração teria causado nas águas uma coloração verde amarronzada, alta turbidez e densidade elevada, o que, por sua vez, teria afetado e diminuído o rendimento atual das piscinas de recreação termal.

Microalgas (termas)

Las algas son organismos capaces de adaptarse a medios vitales muy diferentes y a su vez la alta temperatura y la acidez plantea un reto diferente. Varias especies se han hallado en las aguas de "fuentes o manantiales termales" en el mundo caracterizados por elevadas temperaturas.

Aunque la mayoría de las algas dulces son microscópicas, de allí su denominación como "microalgas", muchas clases son gregarias y pueden formar poblaciones supernumerarias conocidas como floraciones algales, perceptibles a simple vista en lagos y embalses. Las microalgas son individuos que pueden ser unicelulares o pluricelulares y sus células funcionan independientemente realizando todas las funciones vitales.

En Concordia y Uruguay se hallaron algas solo durante el primer muestreo de los pozos de las Termas de la Vertiente de Concordia, Termas de Daymán y Club Remeros de Salto (27 marzo 2007).

La densidad algal determinada en las muestras de agua es baja si se la compara con la de los ambientes húmedos en los cuales éstas se desarrollan habitualmente y resulta muy inferior a la altísima densidad de algas reportada anteriormente para la terma de la Vertiente de Concordia (Secretaría de Turismo, Prov de Entre Ríos), con un valor promedio de cianobacterias en el orden de los 51.870.000 algas/l y de diatomeas en el orden de los 650.000 algas/l. Tal concentración tendría que otorgarle al recurso un color verde amarronado, gran turbidez y densidad, cantidad que a su vez también hubiera afectado y bajado el rendimiento actual de las piletas de recreación termal.

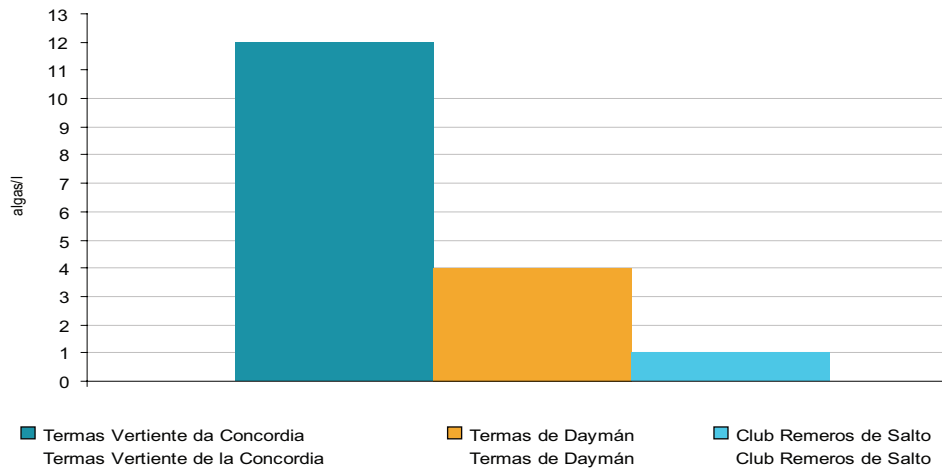


Figura 39.-

Concentração total de algas em poços profundos dos complexos termais da Argentina e do Uruguai.

Das espécies citadas, três gêneros foram novamente encontrados nos resultados da primeira amostragem: Oscillatoriaceae, Anabaena e Navícula.

Além disso, a presença da alga Chlorella nas amostras descarta a possibilidade de que a composição de algas identificada seja própria do aquífero termal. Neste caso pode existir a possibilidade de contaminação da água, pois o gênero Chlorella precisa de luz suficiente para se reproduzir e sobreviver, sendo seu *habitat* natural os ambientes superficiais.

Reservas e disponibilidades hídricas do SAG

O volume de água armazenado no subsolo se identifica de duas maneiras: como reserva reguladora ou renovável e como reserva permanente.

As reservas reguladoras se definem como o volume de água subterrânea, que está disponível para ser explorado e que se renova sazonalmente no subsolo pela infiltração das precipitações atmosféricas e por outras fontes naturais.

As reservas permanentes se definem como o volume de água subterrânea armazenado nos poros e fraturas das rochas e que não são renováveis (pelo menos em escala humana), mas

Figura 39.-

Concentración total de algas halladas en pozos profundos de los Complejos Termales de Argentina y Uruguay.

De las especies citadas en esa oportunidad, tres de los géneros se reportan nuevamente en los resultados del primer muestreo: Oscillatoria, Anabaena y Navícula.

Complementariamente en los resultados, la presencia del alga Chlorella en las muestras de agua descarta la posibilidad de que la composición algal determinada sea propia del Acuífero Termal. Se sugiere al respecto la posibilidad de contaminación del agua debido a que el género Chlorella necesita de suficiente luz para reproducirse y sobrevivir siendo su *hábitat* natural los ambientes superficiales.

Reservas y Disponibilidades Hídricas del SAG

El volumen de agua almacenado en el subsuelo se identifica de dos maneras: como recursos dinámicos y como reservas estáticas.

Los recursos dinámicos se definen como el volumen de agua subterrânea que es renovada estacionalmente en el subsuelo por la infiltración de las precipitaciones atmosféricas y otras fuentes naturales y que están disponibles para ser explotados.

Las reservas estáticas se definen como el volumen de agua almacenada en los poros y grietas de las rocas y no son renovables (al menos en escala humana); pero se pueden explotar hasta cierto valor en áreas

podem ser parcialmente explorados em áreas onde as reservas reguladoras são insuficientes para atender às demandas.

A disponibilidade hídrica em um aquífero confinado de extensão continental, como é o caso do SAG, pode ser definida como a quantidade de água disponível para a utilização e pode ser estimada com base na recarga efetiva e na quantidade de água que pode ser extraída da reserva permanente, durante determinado período, sem causar danos ambientais irreversíveis.

A recarga efetiva, que corresponde à reserva reguladora, representa o volume de água renovável que entra anualmente no aquífero, função direta da recarga sazonal, sendo importante principalmente em regiões onde o aquífero é livre e correspondendo ao volume do fluxo de água na porção confinada do aquífero.

A avaliação dos dados de escoamento total das bacias hidrográficas, analisadas a partir de balanço hídrico efetuado durante a execução do Projeto, mostra que nas bacias localizadas na porção norte do aquífero os escoamentos correspondem a valores de lâmina de água que variam entre 350 e 450 mm/ano (350 e 450 L/m²/ano) e que nas bacias hidrográficas da porção sul, esses valores chegam a variar entre 650–750 mm/ano.

A comparação entre esses valores indica que os possíveis valores de excedente hídrico responsáveis pela recarga profunda do aquífero, por meio das áreas de recarga, não podem ir além de 10–20 mm/ano, valores muito próximos àqueles apresentados por Gilboa et al. (1976). Esses valores representariam para a área de afloramentos, considerada como área de recarga, volumes da ordem de 0,8 a 1,4 km³ de água por ano.

A reserva permanente é definida como a quantidade total de água armazenada no reservatório, podendo ser dividida em duas partes: drenáveis e compressíveis. As reservas drenáveis, ou seja, parte da água drenada espontaneamente pela gravidade no reservatório, representada pela água armazenada nos poros do aquífero; e outra reserva compressível, ou seja, parte da água reservada por compressão, representada pela quantidade de água armazenada por efeitos de compressão do aquífero e expansão da água.

donde los recursos dinámicos son insuficientes para cumplir con el objetivo planteado.

La disponibilidad hídrica en un acuífero de extensión continental y confinado, como el caso del SAG, puede ser definida como la cantidad de agua disponible para utilización, y puede ser estimada en base a la recarga efectiva y en la cantidad de agua que puede ser extraída de la reserva total, o del almacenamiento permanente, por un determinado período, sin causar daños ambientales irreversibles

La recarga efectiva, que corresponde a la reserva activa (dinámica), representa el volumen de agua renovable que entra anualmente en el acuífero, función directa de la recarga estacional, presentando importancia principalmente en las regiones donde el acuífero es libre, y corresponde al volumen del flujo de agua en la porción confinada del acuífero.

La evaluación de los datos de escurrimiento total de las cuencas hidrográficas analizadas en el estudio de balance hídrico efectuado durante la ejecución del Proyecto, muestran que, para las cuencas localizadas en la porción norte del acuífero estos escurrimientos representan valores de lamina de agua que varían entre 350 – 450 mm/año (litros de agua por metro cuadrado de terreno), y para las cuencas hidrográficas de la porción sur, estos valores alcanzan 650 – 750 mm/año.

La comparación entre estos valores, indica que los posibles valores de excedente hídrico que constituirían la recarga profunda del acuífero, a través de las áreas de recarga, no pueden sobrepasar 10 – 20 mm/año, valores muy próximos a los presentados por Gilboa et al. (1976), y que representarían para el área de afloramiento considerada como recarga, volúmenes del orden de 0.8 a 1.4 km³ de agua por año.

La reserva total de agua, o almacenamiento permanente es definida como la cantidad total de agua almacenada en el reservorio, pudiendo ser dividida en dos partes: una denominada drenable, que representa el agua que puede ser drenada por gravedad del acuífero, representando aquella contenida en los poros del reservorio; y una segunda parte, que es el agua contenida en el almacenamiento compresible, representada por la cantidad de agua almacenada por efectos de compresión del acuífero y expansión del agua, denominada reserva compresible.

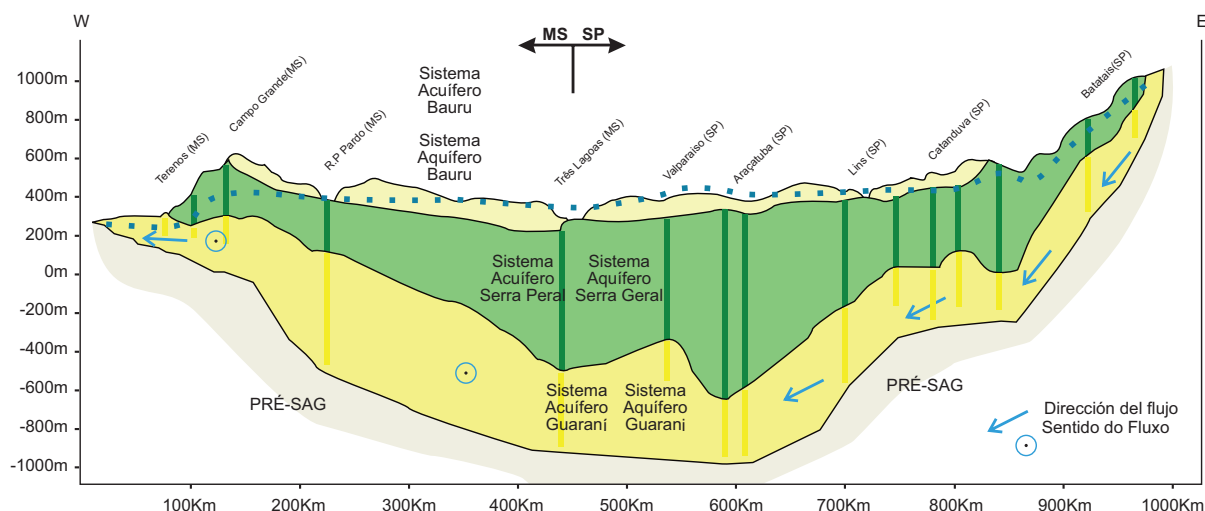


Figura 40.-

Seção esquemática no compartimento norte.

	Reserva drenável (km ³)	Reserva drenável (km ³)	Total (km ³)
Volume de água (15% / S= 10-4)	33.000	51	33.051

Volume de água contida no SAG

		Rebaixamento (m)		
		400	200	100
Reserva permanente explorável (km ³)	Compressível	25	12	4
	Drenável	2.000	1.660	1.610

Disponibilidade hídrica do SAG (30% do volume
drenável)

A reserva reguladora do SAG foi estimada na
simulação numérica por meio de avaliação
rápida dos levantamentos pluviométricos e
fluviométricos efetuados no âmbito do Projeto.

Figura 40.-

Sección esquemática en el compartimiento norte.

	Reserva Drenable (km ³)	Reserva Compresible (km ³)	Total (km ³)
Volumen de Agua (15% / S= 10-4)	33.000	51	33.051

Volumen de agua contenida en el SAG

		Rebajamiento (m)		
		400	200	100
Reserva Estática explotable (km ³)	Compresible	25	12	4
	Drenable	2.000	1.660	1.610

Disponibilidad hídrica del SAG (30% del Volumen
Drenable)

La reserva activa del SAG fue estimada en la
simulación numérica y a través de la evaluación
expeditiva de los levantamientos pluviométricos y
fluviométricos efectuados en el ámbito del Proyecto,

Apesar dos resultados alcançados e do avanço do conhecimento sobre o aquífero e sobre seu funcionamento hidráulico, diversas dúvidas permanecem, principalmente por causa da falta de dados e informações em pontos com pequena concentração de poços.

A pesar de los resultados alcanzados en el avance del conocimiento al respecto del acuífero y su funcionamiento hidráulico, diversas dudas permanecen debido principalmente a la falta de datos e informaciones en puntos con pequeña concentración de pozos.

El modelo conceptual y el modelo numérico constituyen la síntesis del funcionamiento hidráulico del SAG condicionado por una compleja geología, los controles estructurales, la recarga directa proveniente de la precipitación e indirecta de los basaltos fracturados/alterados, la interacción con formaciones infrayacentes, la interacción del flujo subterráneo y superficial en zonas de afloramiento, las descargas a través de los bordes acuífero, la potencial descarga hacia los ríos Paraguay y Uruguay y otros sumideros, y la explotación para diversos usos.

O modelo numérico de simulação do fluxo subterrâneo, realizado com os códigos TRANSIN e VISUALTRANSIN, foi estruturado com uma série de componentes: domínio de modelagem e malha, recarga, bombeamento, zonas de permeabilidade, condições de contorno, interação de aquífero/rios e poços de observação de níveis. O modelo simula o SAG operacional, sem incluir as formações subjacentes e sobrejacentes, e é de caráter contínuo em toda sua extensão, sem incluir explicitamente elementos estruturais.

As simulações permitiram, em geral, validar o modelo conceitual proposto, provar hipóteses alternativas de controles de fluxo e identificar zonas de domínio de modelagem que apresentam deficiências de informação e incertezas. Além disso, permitiram estimar a influência do aumento da exploração em duas zonas críticas e de uma distribuição hipotética da recarga por um período de 100 anos.

Do ponto de vista exclusivo do modelo regional, foi observada uma importante melhora com relação ao pré-modelo de Vives et. al (2001), fundamentalmente em: domínio de simulação; melhor informação de pontos de medidas confiáveis; uma ampla análise geológica e estratigráfica; e um profundo tratamento das extrações. Entretanto, é necessário dar continuidade e aprofundar a análise da geologia e das estruturas, além da informação isotópica e hidrogeoquímica, que não foi integrada ao modelo conceitual. Isso permitirá revisar a hipótese de que o SAG operacional é uma unidade geológica contínua sem conexão hidráulica com formações subjacentes e sobrejacentes.

Partindo dos resultados obtidos nos diferentes cenários analisados, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- O domínio de modelação, que se estende a todo o SAG operacional, permite realizar uma modelagem numérica mais realista que as precedentes.
- A modelagem de diferentes cenários geológicos com resultados aparentemente comparáveis poderia indicar a necessidade de continuar pesquisando e melhorando tanto o modelo geológico estrutural quanto o hidrogeológico.
- A direção predominante do fluxo em âmbito regional é de norte e leste até o centro da bacia. Esse fluxo é influenciado pelas características tectônicas e estruturais da bacia sedimentar.

El modelo numérico de simulación del flujo subterráneo, realizado con los códigos TRANSIN y VISUALTRANSIN, fue estructurado en una serie de componentes: dominio de modelación y malla, recarga, bombeo, zonas de permeabilidad, condiciones de borde, interacción acuífero/ río y pozos de observación de niveles. Sólo se simula el denominado SAG operativo sin incluir las formaciones infra y suprayacentes, y es de carácter continuo en toda su extensión sin incluir explícitamente elementos estructurales.

Las simulaciones permitieron validar en general el modelo conceptual propuesto, probar hipótesis alternativas de controles del flujo, identificar zonas del dominio de modelación que presentan deficiencias de información e incertidumbre, y valorar la influencia del incremento de las explotaciones en dos zonas críticas y de una hipotética distribución de la recarga por un período de 100 años.

Desde el punto de vista exclusivo del modelo regional se ha percibido una importante mejora respecto al premodelo de Vives et. al (2001), fundamentalmente en: dominio de simulación, mayor información de puntos de medidas confiables, un amplio análisis geológico estratigráfico, y un profundo tratamiento de las extracciones. Sin embargo se necesita continuar y profundizar el análisis de la geología y las estructuras, además de la información isotópica e hidrogeoquímica que no fue integrada al modelo conceptual para así revisar la hipótesis de que el SAG operativo es una unidad geológica continua sin conexión hidráulica con formaciones infra y suprayacentes.

Partiendo de los resultados obtenidos en los diferentes escenarios analizados se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- *El dominio de modelación, que se extiende a todo el SAG operativo, permite realizar una modelación numérica más realista que las precedentes.*
- *La modelación de diferentes escenarios geológicos con resultados aparentemente comparables podría estar indicando la necesidad de continuar investigando y mejorando tanto el modelo geológico-estructural como hidrogeológico.*
- *La dirección predominante de flujo a nivel regional es de norte y este hacia el centro de la cuenca, influenciada por las características tectónicas/estructurales de la cuenca sedimentaria.*

- Os gradientes hidráulicos simulados são, em geral, semelhantes aos propostos pelo modelo conceitual. O mapa potenciométrico integra níveis medidos em um intervalo de vinte a trinta anos.
- A borda ocidental de afloramento é uma região de recarga local e de descarga regional e local.
- As simulações indicam que trechos de várias drenagens superficiais em zonas de afloramento poderiam ser vias de descarga do aquífero, pelo menos dos níveis mais rasos, reduzindo a recarga profunda.
- Os valores de condutividade hidráulica calibrados e calculados tendem a ser maiores que os esperados. Esse efeito deve-se, possivelmente, ao fato de que o modelo não representa as unidades subjacentes e sobrejacentes nem as estruturas, ou pelo fato de que os fluxos de água sejam ainda menores do que os calculados, ou uma mescla de ambas as situações.
- A hipótese de descarga regional do SAG através de trechos dos Rios Uruguai e Paraná é plausível e compatível com os demais componentes do balanço de massa. Este fluxo é da ordem de 0,9–1,8 m³/s no Rio Paraná e 7,4–9,8 m³/s no Rio Uruguai. Significa dizer que o Rio Paraná estaria recebendo do SAG, portanto, 10% do que recebe o Rio Uruguai.
- A hipótese de fluxos ascendentes a partir do SAG em direção a formações sobrejacentes em um setor central (provável localização) é plausível, dado a surgência nessa zona e as grandes diferenças de espessura do basalto nas margens direita e esquerda da calha central. Isso poderia refletir descontinuidades litológicas importantes, favorecendo potenciais fluxos preferenciais.
- Os termos dominantes do balanço de massa são a recarga e a descarga nos rios. Para as simulações sazonais, as explorações são da ordem de 1.040 hm³/ano, o que corresponde a 29% da recarga calculada. Os fluxos subterrâneos do balanço de massa, que não podem ser verificados com estimativas independentes, são pequenos se comparados com as vazões mínimas dos Rios Uruguai e Paraná.
- Os efeitos do aumento da exploração são notórios e imediatos em locais próximos ao bombeamento, enquanto ocorrem

- *Los gradientes hidráulicos simulados resultan en general similares a los planteados en el modelo conceptual, teniendo presente que el mapa potenciométrico integra niveles medidos en un intervalo de 20-30 años.*
- *El borde occidental de afloramiento es una región de recarga local y de descarga tanto regional como local.*
- *Las simulaciones indicarían que los tramos de numerosos cursos superficiales en zonas de afloramiento podrían ser vías de descarga del acuífero, al menos de los niveles más someros, reduciendo la recarga profunda.*
- *Los valores de conductividades hidráulicas calibradas o calculadas tienden a ser mayores que los esperados. Este efecto puede deberse a que el modelo no representa las unidades infra y suprayacentes ni las estructuras, o que los flujos de agua sean aún más pequeños de los que se han calculado, o una mezcla de ambas situaciones.*
- *La hipótesis de descarga regional del SAG a través de tramos de los ríos Uruguay y Paraná resulta plausible y compatible con las demás componentes del balance de masa. Este flujo es del orden de 0,9-1,8 m³/s y 7,4 a 9,8 m³/s para el río Paraná y Uruguay, respectivamente. Es decir, el río Paraná estaría recibiendo del SAG un 10% de lo que recibe el Uruguay.*
- *La hipótesis de flujos ascendentes desde el SAG hacia las formaciones suprayacentes en un sector central (localización tentativa) resulta plausible dada la surgencia en dicha zona y las grandes diferencias de espesores de basalto a un lado y otro de la calha central. Esto podría dar lugar a discontinuidades litológicas importantes favoreciendo potenciales flujos preferentes.*
- *Los términos dominantes del balance de masa son la recarga y la descarga hacia los ríos. Para las simulaciones estacionarias, las explotaciones son del orden de 1.040 hm³ por año que corresponden al 29 % de la recarga calculada. Los flujos subterráneos del balance de masa, aunque no pueden verificarse con estimaciones independientes, son pequeños comparados con los caudales mínimos de los ríos Uruguay y Paraná.*
- *Los efectos del incremento de la explotación son notorios e inmediatos en*

de uma forma escalonada ao longo do tempo à medida que se vão afastando da exploração. Em distâncias maiores que 300 km, o efeito de bombeamento é imperceptível, pelo menos nas condições impostas no cenário de exploração realizado (100 anos). É importante recordar que a qualidade da água não foi modelada.

- Foram demonstradas a potencialidade e a necessidade de calibrar o modelo numérico para um transitório, fundamentalmente por causa do baixo fluxo subterrâneo que poderia determinar regiões onde pode ser afetado o armazenamento, modelo fundamental para o gerenciamento sustentável dos recursos subterrâneos em aquíferos com pequena taxa de renovação.

sitios cercanos al bombeo, mientras que se registran en forma escalonada en el tiempo a medida que uno se aleja de la explotación. Más allá de los 300 km, el efecto del bombeo sería imperceptible, al menos en las condiciones impuestas en el escenario de explotación realizado (100 años). Es importante tener presente que no se ha modelado la calidad del agua.

- *Se ha mostrado la potencialidad y necesidad de calibrar el modelo numérico para un transitorio, fundamentalmente por el bajo flujo subterraneo que podría determinar regiones donde puede ser afectado el almacenamiento, modelo fundamental para el gerenciamento sustentable de los recursos subterrâneos en acuíferos con poca tasa de renovación.*

6 CONCLUSÕES

A construção do modelo conceitual de funcionamento hidráulico do SAG está baseada na interpretação do comportamento do fluxo das águas subterrâneas em seu interior. Essa interpretação é feita a partir do conhecimento do marco geológico da Bacia do Paraná.

Como foi apresentado no item que descreve o comportamento hidrodinâmico do SAG, existe uma grande correlação entre o fluxo das águas subterrâneas e a estrutura geológica na qual o aquífero está inserido (áreas de recarga relacionadas com regiões elevadas por eventos tectônicos, zonas de menor gradiente hidráulico, associadas a regiões onde a espessura do aquífero é maior, e condicionantes de fluxo determinados pela presença de diques de diabásio, como no caso do Arco de Ponta Grossa, no Estado do Paraná).

As questões mais relevantes relacionadas ao atual conhecimento do SAG podem ser resumidas da seguinte forma:

- As principais áreas de recarga estão localizadas no limite leste do aquífero, com tendência regional de fluxo em direção à porção sul. As estruturas da Bacia do Paraná (Arco de Ponta Grossa e Dorsal Assunção—

6 CONCLUSIONES

La construcción del modelo conceptual de funcionamiento hidráulico del SAG está basada en la interpretación del comportamiento del flujo de las aguas subterrâneas en su interior a partir del conocimiento del marco geológico de la cuenca del Paraná.

Como fue presentado en el ítem que describe el comportamiento hidrodinâmico del SAG, existe una gran correlación entre el flujo de las aguas subterrâneas y el andamiaje geológico en el cual el acuífero está inserto, áreas de recarga relacionadas a regiones elevadas tectónicamente, zonas de menor gradiente hidráulico asociadas a regiones donde los espesores del acuífero son mayores, así como condicionamiento de flujo por la presencia de diques de diabasa, como en el caso del arco de Ponta Grossa, en el estado de Paraná.

Los puntos sobresalientes respecto al conocimiento actual del SAG se pueden resumir en:

- *Las principales áreas de recarga están localizadas en el borde este del acuífero, con tendencia regional del flujo dirigido para la porción sur; las estructuras de la cuenca del Paraná, arco de Ponta Grossa y la dorsal Asunción-Río Grande*

Rio Grande) influenciam o comportamento do fluxo. O primeiro atua com uma grande barreira hidráulica. O segundo, por ter elevado o SAG, condiciona a descarga ao longo dos Rios Paraná e Uruguai.

- A existência de áreas de descarga no limite oeste de SAG, no Estado do Mato Grosso do Sul (Bacia do Rio Paraguai), e a existência de janelas de arenitos entre os basaltos condicionam o aparecimento de um divisor de águas subterrâneas paralelo ao divisor de águas superficiais, existente entre as Bacias dos Rios Paraná e Paraguai.
- As principais zonas de descarga estão associadas às faixas de afloramento, localizadas no limite oeste do aquífero, e à faixa leste-oeste, localizada no Estado do Rio Grande do Sul.
- O aquífero pode ser dividido em quatro grandes domínios hidrodinâmicos, condicionados por essas condições de contorno e por essas estruturas.
- A região com menor gradiente hidráulico, localizada na porção norte do aquífero, está diretamente relacionada com as maiores espessuras das unidades que constituem o SAG observadas nessa região.
- O efeito de elevação acentuada do limite leste do SAG acentua os gradientes hidráulicos observados.
- Em função da impossibilidade de recarga no limite norte do aquífero (aquífero coberto por camada de basalto), existe uma condição de não fluxo naquela área.
- Essa mesma condição está presente na região do Domo de Lages, no Estado do Rio Grande do Sul, onde não ocorre recarga do aquífero em função da alta declividade do terreno.
- Ao longo do Rio Paraná existe uma zona onde o SAG apresenta artesianismo (condição de surgência nos poços). Esse fenômeno ocorre em uma faixa com largura de 300 km, localizada nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná (norte do estado). Essa faixa fica mais estreita no Sul do território brasileiro, estendendo-se até a província de Corrientes, no território argentino. Há outra região de artesianismo na fronteira entre a Argentina e o Uruguai, ao longo do Rio Uruguai. Trata-se de uma faixa de 50 km de largura, aproximadamente, que

influencian el comportamiento del flujo, el primero actuando como una gran barrera hidráulica y el segundo, por haber elevado el SAG, condiciona la descarga a lo largo de los ríos Paraná y Uruguay.

- *La existencia de áreas de descarga en el borde oeste del SAG en el estado de Mato Grosso do Sul, ya en la cuenca del río Paraguay, sumado a la existencia de ventanas de areniscas entre los basaltos, condiciona la existencia de un divisor de aguas subterráneas paralelo al divisor de aguas superficiales, existente entre las cuencas del río Paraná y Paraguay.*
- *Las principales zonas de descarga están asociadas a las fajas de afloramiento localizadas en el borde oeste del acuífero, y en la faja EW localizada en el estado de Río Grande do Sul.*
- *El acuífero puede ser compartimentado en cuatro grandes dominios hidrodinámicos, condicionados por estas condiciones de contorno y por las estructuras.*
- *La región con el más bajo gradiente hidráulico, que se observa en la porción norte del acuífero está directamente relacionada a los mayores espesores de las unidades constituyentes del SAG observados en aquella región.*
- *El efecto del levantamiento pronunciado del borde este del SAG acentúa los gradientes hidráulicos observados.*
- *En función de la imposibilidad de recarga en el límite norte del acuífero, ya que el mismo se encuentra recubierto por los basaltos, se establece la existencia de una condición de no flujo en aquella área.*
- *Esta misma condición es observada en la región del Domo de Lages, en el estado de Río Grande do Sul, donde no existe la recarga del acuífero en función de la alta declividad del terreno.*
- *Es reconocida, a lo largo del río Paraná, una zona donde el SAG presenta artesianismo (condición de surgencia en pozos). Este fenómeno ocurre en una faja con ancho de cerca de 300 km en los estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul y Paraná (norte del estado), estrechándose sensiblemente en el sur del territorio brasileiro, siguiendo hasta la provincia de Corrientes en territorio argentino. Una segunda región de artesianismo es reconocida en la frontera entre los territorios uruguayo y argentino, a lo largo del río*

fica mais larga na porção sul do SAG, no território uruguaio.

- O zoneamento hidroquímico apresenta clara relação com o substrato do aquífero. Toda a zona de ocorrência de águas com maiores concentrações de sulfatos e cloretos está associada ao substrato do aquífero, onde se dá a ocorrência da Formação Rio do Rastro.

Uruguay, en una faja de ancho aproximado de 50 km, con aumento en la porción sur del área de ocurrencia del SAG, en territorio uruguayo.

- *La zonación hidroquímica presenta clara relación con el sustrato del acuífero, toda la zona de ocurrencia de aguas con mayores concentraciones de sulfatos y cloruros, está asociada al sustrato del acuífero, donde se da la ocurrencia de la Formación Río do Rastro.*

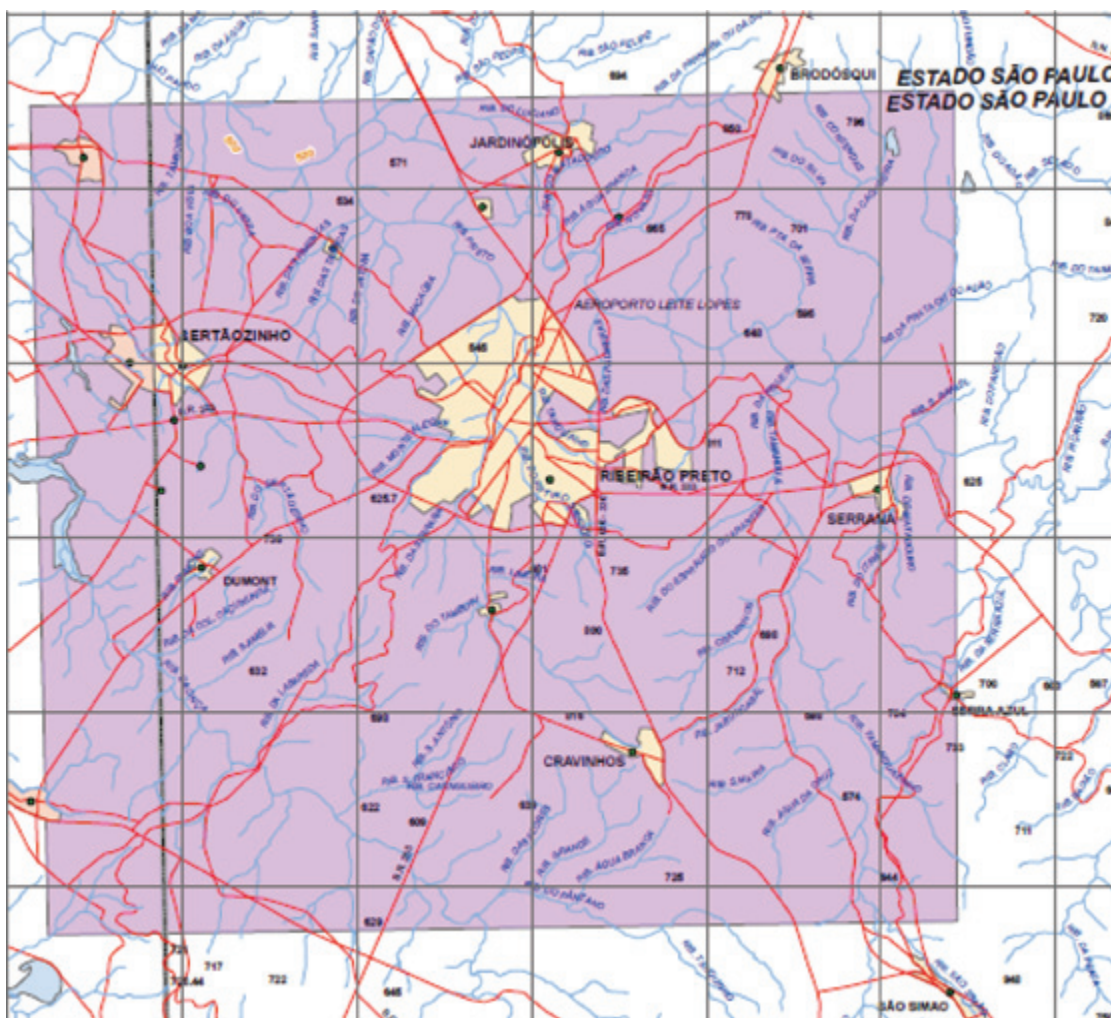
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Os documentos utilizados na confecção da presente síntese foram:

CONSÓRCIO Guaraní. **Relatório hidrogeológico.**
CONSÓRCIO Guaraní. **Relatório de isotopia.**
CONSÓRCIO Guaraní. **Relatório de hidroquímica.**
CONSÓRCIO Guaraní. **Relatório de climatologia.**
CONSÓRCIO Guaraní. **Relatório de hidrologia.**
CONSÓRCIO Guaraní. **Mapa hidrogeológico.**
CONSÓRCIO Guaraní. **Informe sociodemográfico.**
CONSÓRCIO Guaraní. **Modelo numérico regional.**
LAVALIN – P e T. **Relatório de geologia.**
LAVALIN – LCV. **Relatório de petrografia.**
LAVALIN – Geodatos. **Relatório de geofísica.**
LAVALIN. **Hidrogeologia de áreas-piloto.**
LAVAGEM. **Estudos socioeconômicos de áreas-piloto.**

8 ANEXO: EXPERIÊNCIAS LOCAIS – OS PROJETOS- PILOTO

8 ANEXO: EXPERIENCIAS LOCALES – LOS PROYECTOS PILOTO



Ribeirão Preto, Brasil.

O Projeto-Piloto Ribeirão Preto concentra-se no município de mesmo nome, localizado no noroeste do Estado de São Paulo. A área do projeto engloba uma população de aproximadamente 500 mil habitantes e sua

Ribeirão Preto, Brazil.

El Proyecto Piloto de Ribeirão Preto (RP) se centra en la municipalidad y ciudad del mismo nombre, localizadas en la parte noreste del Estado de São Paulo, con una población de unos 500.000 habitantes. Comprende un área de 2.500 km², e incluye territorios

extensão é de cerca de 2.500 km², incluindo territórios de municípios vizinhos a Ribeirão Preto (Jardinópolis, Sertãozinho, Dumont, Serrana, Serra Azul, Cravinhos e Brodósqui). As atividades do projeto concentraram-se em uma área de 651 km², dos quais 137 são de afloramentos do Aquífero Guaraní. O restante da superfície é coberto pelos basaltos da Serra Geral.

Os arenitos do Sistema Aquífero Guaraní estão confinados na parte ocidental da área-piloto por uma camada de basalto que chega a 200 m de espessura. Na parte oriental da área-piloto, os arenitos afloram. O aquífero está sobre uma camada de rochas permianas que consistem em uma sequência de argilitos, arenitos e siltitos finos, os quais armazenam água, apesar de serem menos permeáveis do que o aquífero que os cobre. As rochas paleozóicas estão sobre rochas cristalinas de baixa permeabilidade do embasamento pré-cambriano.

A recarga do aquífero provém, predominantemente, da precipitação sobre as áreas de afloramento e se estima um valor aproximado a 135 mm/ano. Em escala regional, o fluxo das águas subterrâneas parece ser de leste para oeste. Após décadas de exploração excessiva do aquífero no município de Ribeirão Preto, os níveis de água caíram, formando um cone de depressão dentro da área urbana da cidade.

A região é um centro de atividade agrícola, sendo a maior produtora mundial de açúcar e álcool. A cana-de-açúcar é cultivada de forma extensiva, assim como algumas árvores cítricas. Na região há indústrias de processamento de soja, café, alimentos, víveres e fertilizantes. Por causa do rápido crescimento urbano e da intensa atividade agrícola e industrial, houve um aumento da demanda por recursos hídricos subterrâneos, principalmente do Aquífero Guaraní, o que resultou um rebaixamento significativo dos níveis de água subterrânea, principalmente dentro da cidade de Ribeirão Preto. O nível freático chegou a ficar entre 30 e 40 metros mais baixo do que era na década de 1970.

Entre os efeitos colaterais observados são:

- Aumento dos custos operacionais do fornecimento de água potável, causado

correspondientes a varios municipios vecinos (incluye las ciudades de Jardinópolis, Sertãozinho, Dumont, Serrana, Serra Azul, Cravinhos y Pradópolis), aunque el foco principal de acciones se centró en un área de 651 km², que incluye 137 km² de afloramiento del acuífero Guaraní, siendo la superficie restante ocupada por los Basaltos de Serra Geral suprayacentes.

Las areniscas del Sistema Acuífero Guaraní, se encuentran confinadas en la parte occidental del área piloto debajo de basaltos que alcanzan un espesor de casi 200 m dentro del área de estudio. Las areniscas afloran dentro de la mitad oriental del área piloto. El acuífero yace directamente encima de rocas de la edad pérmica que consisten en una secuencia de fangolitas, areniscas y limos finos, los cuales, aunque almacenan agua, son menos permeables que el acuífero suprayacente. Las rocas paleozoicas yacen sobre rocas cristalinas de baja permeabilidad del basamento precámbrico.

La recarga del acuífero es predominantemente a través de la precipitación sobre las áreas de afloramiento y se estima en un valor aproximado a 135 mm/año. A escala regional el movimiento de agua subterránea parece ir en dirección este a oeste aunque, debido a la sobreexplotación durante décadas del acuífero en el municipio de Ribeirão Preto, los niveles de agua han descendido significativamente, creando un cono de depresión dentro del área urbana de la ciudad.

Esta área es un centro de actividad agrícola, ya que es la región de mayor producción de azúcar y alcohol en el mundo, con áreas extensas de cultivo de caña de azúcar y árboles cítricos. En la región existen, entre otras, industrias de procesamiento de soja, café, alimentos, víveres e industrias de fertilizantes. Debido al rápido crecimiento urbano y a las intensas actividades agrícolas e industriales, ha habido un gran desarrollo de la utilización de los recursos de agua subterránea, principalmente del Acuífero Guaraní, lo que ha resultado en una disminución significativa en los niveles de agua subterránea, especialmente dentro de la ciudad de Ribeirão Preto; llegando en algunos casos a descensos de 30 a 40 m en los niveles freáticos en relación con el nivel de los años 1970.

Entre los efectos colaterales observados se encuentran:

- *incremento de los costos de operación para el suministro del agua potable, como*

pelo rebaixamento do nível freático e pela diminuição da produtividade dos poços, que perderam suas seções superiores.

- Perda do confinamento da água subterrânea em alguns poços.
- Alguns cursos de água que antes eram efluentes agora são influentes, o que aumenta o risco de contaminar a água subterrânea.

O Departamento de Águas de Ribeirão Preto (Daerp) tem 95 poços em operação, com um rendimento potencial de aproximadamente 3.700 litros por segundo. Sua produção atual é estimada em 65 Mm³/ano. A quantidade real de água subterrânea extraída é incerta, porém se estima que cresceu de 45 Mm³/ano em 1976 para 96 Mm³/ano em 1996.

A tabela a seguir resume a distribuição da extração de água subterrânea na cidade de Ribeirão Preto e nas cidades de seu entorno.

resultado del abatimiento del nivel freático y la disminución de la productividad de los pozos a causa de haberse perdido las secciones superiores de sus rejillas

- *pérdida del confinamiento del agua subterrânea en algunos pozos*
- *algunos cursos de agua que antes eran efluentes son ahora afluentes, lo cual incrementa el riesgo de contaminar el agua subterrânea.*

El DAERP (Departamento de Águas e Esgotos de Ribeirão Preto) tiene unos 95 en operación activa con un rendimiento potencial aproximado de 3.700 l/s y una producción actual estimada en 65 Mm³/año, aproximadamente. Sin embargo, el grado de incertidumbre sobre la cantidad real de agua subterrânea extraída es importante, aunque se estima que ha crecido de 45 Mm³/año en 1976 a 96 Mm³/año en 1996.

La tabla siguiente resume la distribución de la extracción de agua subterrânea para la ciudad de Ribeirão Preto y las ciudades circundantes:

Cidade/ município	Cidade	População ²	Consumo (m ³ /d)	Outros usos ³ (m ³ /d)	Extração total ⁴ (m ³ /d)
Ribeirão Preto	Ribeirão Preto	551.300	348.000	16.000	364.000
Entorno	Serra Azul	8.200	67.200	80.000	147.200
	Serrana	38.500			
	Cravinhos ¹	32.100			
	Jardinópolis	34.900			
	Sertãozinho	104.600			
	São Simão	14.700			
	Dumont	7.100			
Total		791.400	415.200	96.000	511.200

Notas:

¹ A água subterrânea é utilizada no abastecimento de 50% da população.

² Estimativa com base no Censo Populacional de 2005 (IBGE).

³ Inclui usos industriais, como o processamento da cana-de-açúcar, a produção de leite, a indústria farmacêutica, a de alimentos, entre outros.

⁴ Comunicação de geólogo do Daerp (2008).

Ciudad/ municipio	Ciudad	Población ²	Consumo (m³/d)	Otros usos ³ (m³/d)	Extracción total ⁴ (m³/d)
Ribeirão Preto	Ribeirão Preto	551.300	348.000	16.000	364.000
Ciudades circundantes	Serra Azul	8.200	67.200	80.000	147.200
	Serrana	38.500			
	Cravinhos ¹	32.100			
	Jardinópolis	34.900			
	Sertãozinho	104.600			
	São Simão	14.700			
	Dumont	7.100			
Total		791.400	415.200	96.000	511.200

Notas:

¹ El agua subterránea se suministra solo al 50% da población.

² Estimación a partir de contagem de población 2005 (IBGE).

³ Incluye usos industriales como caña de azúcar, leche, farmacéuticas, alimentos y otros usos privados.

⁴ Comunicación de geólogo do DAERP (2008)

Alcalinidade mg/l	CE µS/cm	pH	T °C
9,2 - 103,1	5 - 202	5,33 - 7,95	22 - 31,3
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
0,04 - 23	0,05- 11,8	0,005 - 3,74	0,7 - 4,9
Cl mg/l	F mg/l	N-NO ³ mg/l	SO ⁴ mg/l
0,025 - 11,5	0 - 0,893	0 - 3,1	0,02 - 0,88

As faixas de valores das principais variáveis analisadas no processo de execução do projeto estão na tabela a seguir.

Os resultados dos diagramas de Piper para os 26 poços de Ribeirão Preto apresentaram características geoquímicas coerentes com a geologia local. Com relação à química dos

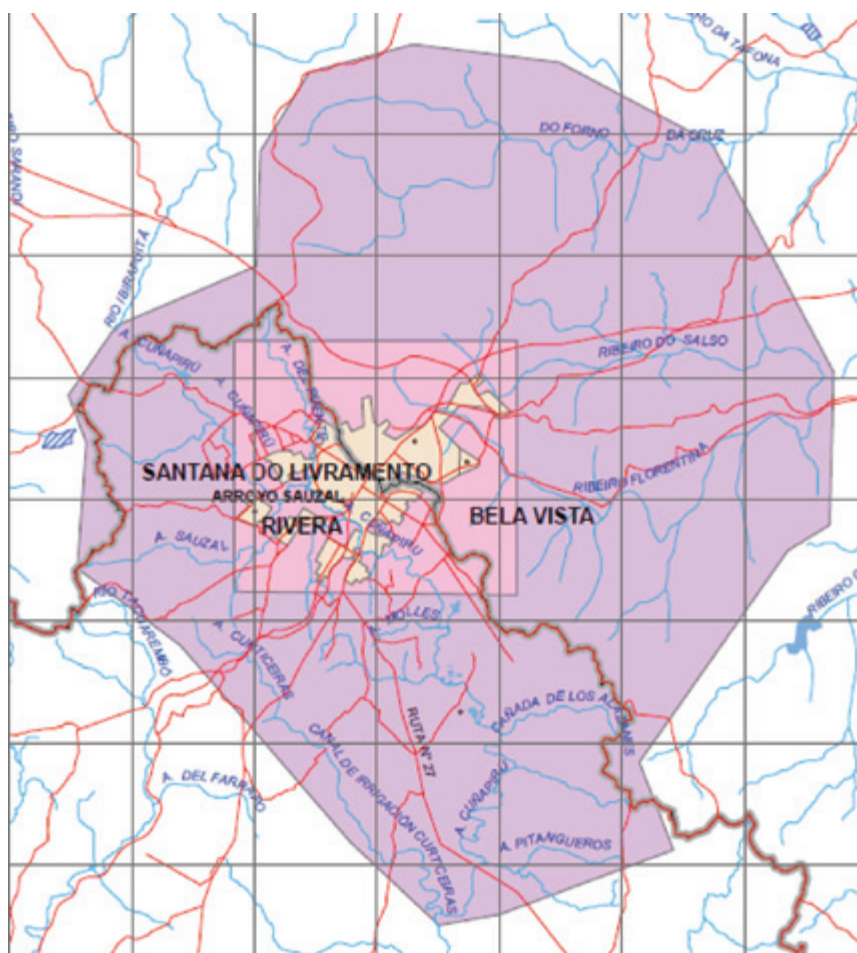
Alcalinidad mg/l	CE µS/cm	pH	T °C
9,2 - 103,1	5 - 202	5,33 - 7,95	22 - 31,3
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
0,04 - 23	0,05- 11,8	0,005 - 3,74	0,7 - 4,9
Cl mg/l	F mg/l	N-NO ³ mg/l	SO ⁴ mg/l
0,025 - 11,5	0 - 0,893	0 - 3,1	0,02 - 0,88

El rango de valores para las principales variables analizadas en el marco de la ejecución del Proyecto se muestra en la tabla adjunta.

Los resultados de los diagramas Piper para los 26 pozos de Ribeirão Preto presentaron características geoquímicas coherentes con la geología del lugar. Con relación a la química de los cationes, las

muestras trazadas para ocho pozos dieron como resultado aguas cálcicas, quince dieron aguas mezcladas cálcica-sódica-magnésicas, y un pozo dio como resultado agua sódica.

Con respecto a la química de aniones, los veintiséis pozos se delinearon como aguas bicarbonatadas. Dado el escenario hidrogeológico (pozos relativamente someros en, o muy próximos al área de recarga del SAG y por lo tanto agua subterránea relativamente “reciente”), se espera el predominio del anión bicarbonato. Al combinar los resultados de los cationes y los aniones, el agua de veinticinco pozos se caracteriza como agua bicarbonatada cálcico-magnésica- y solo un pozo se delinea como agua bicarbonatada sódica.



Rivera, Uruguay/Livramento, Brasil.

O Projeto-Piloto Rivera/Livramento engloba uma área de 750 km² localizada na fronteira entre o Uruguai (Departamento de Rivera) e o Brasil (Estado do Rio Grande do Sul). Essa fronteira coincide com um divisor de águas baixo e irregular que está sobre o Aquífero Guaraní. O nível freático nessa área é baixo.

O fluxo de água subterrânea concentra-se, principalmente, nos horizontes mais permeáveis do aquífero, com uma espessura variável (entre 40 e 80 metros). O fluxo natural é na direção nordeste, porém ele foi modificado por causa da extração, que rebaixou os níveis das águas subterrâneas em aproximadamente 5 metros nos últimos dez anos.

Juntas, as cidades de Rivera e Santana do Livramento têm uma população de aproximadamente 200 mil habitantes, igualmente distribuídos dos dois lados da fronteira. Essa população, que interage como se morassem em uma única cidade, cresce rapidamente.

As principais atividades econômicas são do setor agropecuário (lã, carne, peles, uvas, milho e, cada vez mais, soja). No lado uruguaio destaca-se também a produção de madeira. As principais fontes potenciais de contaminação são os matadouros e as madeireiras.

O Aquífero Guaraní aflora em boa parte da área-piloto, e o resto está coberto por uma camada fina de basaltos da Serra Geral. O SAG é a principal fonte de abastecimento e é explorado pelos poços perfurados pela Obras Sanitárias do Estado (OSE), em Rivera, e pelo Departamento de Águas e Esgoto (DAE), em Livramento. O que é extraído desses poços corresponde a cerca de 80% e 100% do abastecimento público dessas cidades, respectivamente. Além disso, a OSE opera um pequeno reservatório de águas superficiais construído pelos britânicos nos anos 1940, de onde provém os 20% restantes.

A rede de abastecimento de água cobre mais de 95% da população. O consumo estimado total, incluindo as zonas suburbanas e rurais próximas, varia entre 50.000 e 60.000 m³ por dia. Desse total, entre 40.000 e 50.000 m³ provém do aquífero dentro da área-piloto. Entre 25.000 e 30.000 m³ são consumidos em Santana do Livramento e de 14.000 a 15.000, em Rivera.

El Proyecto Piloto de Rivera / Livramento comprende un área de 750 km², situado sobre la frontera entre Uruguay (Departamento de Rivera) y Brasil (Estado de Río Grande do Sul). Dicha frontera coincide con un divisor de aguas bajo pero ondulado y se encuentra por encima del Acuífero Guaraní con un nivel freático somero.

El flujo de agua subterránea se concentra principalmente en los horizontes más permeables del acuífero, en un espesor que varía entre 40 y 80 m, con dirección natural nor-este pero modificada por la extracción, la cual ha abatido los niveles del agua subterránea en aproximadamente 5 m en los últimos diez años.

Las ciudades de Rivera y Santana do Livramento tienen una población conjunta cercana a los 200.000 habitantes, dividida en partes casi iguales, con un crecimiento rápido, y que viven e interactúan casi como una sola ciudad.

La principal actividad económica se basa en la agricultura (ganado y ovejas de lana, producción de carne y pieles, uvas, maíz y cada vez más soja), aunque en el lado uruguayo además hay producción forestal y de madera. Las fuentes potenciales de contaminación son los rastros y los aserraderos.

El Acuífero Guaraní aflora en buena parte del área piloto y el resto está cubierto por una capa delgada de los Basaltos de la Serra Geral. El SAG constituye la principal fuente de abastecimiento a través de los pozos de Obras Sanitarias del Estado (OSE) en Rivera y del Departamento de Água e Esgoto (DAE) en Livramento, que representan alrededor de 80% y 100% del abastecimiento público total respectivamente. Además, OSE opera un pequeño reservorio de agua superficial construido por los británicos en los años 40 que aporta el 20% restante.

La red de abastecimiento de agua cubre a más del 95% de la población. El consumo total estimado, incluyendo las zonas suburbanas y rurales cercanas es de alrededor de 50.000 – 60.000 m³/día. Se estima que del consumo diario total alrededor de 40.000 - 50.000 m³/día se obtienen del acuífero dentro del área piloto. Del consumo total alrededor de 25.000 – 30.000 m³/día se usan en Santana do Livramento y 14.000 – 15.000 m³/día se usan en Rivera.

Alcalinidade mg/l	CE μS/cm	pH	T °C
10,4 - 182,6	33 - 342	5,3 - 7,7	19,4 - 22,8
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
4,5 - 41,8	1,1 - 10	5,1 - 30,2	0,8 - 4,2
Cl mg/l	F mg/l	N-NO ³ mg/l	SO ⁴ mg/l
14,9 - 151,5	0,06 - 0,33	0,6 - 20,47	1,73 - 9,15

Os resultados dos diagramas de Piper para vinte poços do SAG, analisados na área de Rivera e Santana do Livramento, revelaram uma característica geoquímica relativamente consistente.

Com relação à química dos cátions, quatro poços apresentaram águas com cálcio, e outros quatro, águas com magnésio. Os poços restantes apresentam águas misturadas (cálcio e magnésio). Com relação aos ânions, 14 poços apresentaram águas com bicarbonato e seis, com cloretos. Dado o contexto hidrogeológico (poços rasos em uma zona de recarga que apresentam, portanto, águas relativamente doces), era de se esperar o predomínio do ânion bicarbonato. A presença de água com cloretos nesse ambiente é anômala. Esse fato está diretamente relacionado com a contaminação da água subterrânea rasa localizada nos setores povoados da área-piloto e em seu entorno. Ao combinar os resultados de cátions e ânions, as águas de 14 poços caracterizam-se como águas bicarbonatadas cálcico-magnesianas, enquanto em seis poços outros poços são águas cloretadas cálcico-magnesianas.

O principal problema da gestão da qualidade das águas subterrâneas está associado com as falhas da rede de coleta de esgoto. Essa rede cobre somente 30% da população da cidade de Rivera e 40% da população de Livramento, o que causa uma grande descarga subsuperficial de esgoto proveniente de unidades de saneamento *in situ* localizadas em extensas áreas da cidade.

Tanto a OSE quanto o DAE possuem grupos de poços com rendimentos superiores a 100 m³ por

Alcalinidad mg/l	CE μS/cm	pH	T °C
10,4 - 182,6	33 - 342	5,3 - 7,7	19,4 - 22,8
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
4,5 - 41,8	1,1 - 10	5,1 - 30,2	0,8 - 4,2
Cl mg/l	F mg/l	N-NO ³ mg/l	SO ⁴ mg/l
14,9 - 151,5	0,06 - 0,33	0,6 - 20,47	1,73 - 9,15

Los resultados de los diagramas Piper para veinte de los pozos SAG del área Rivera - Santana do Livramento mostraron una característica geoquímica relativamente consistente.

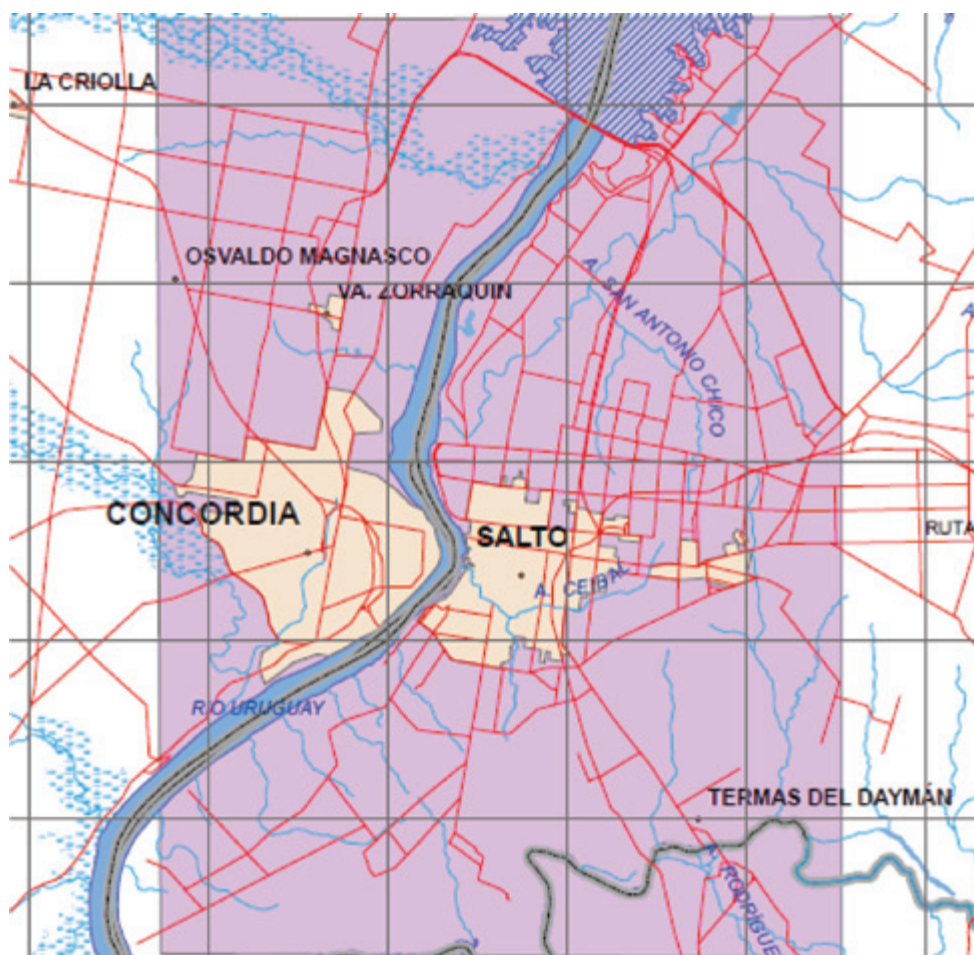
Con relación a la química de los cationes, cuatro de los pozos trazados mostraron aguas con calcio y otros cuatro dieron aguas con magnesio, y los restantes dieron aguas que son mezcla de estos dos tipos. Respecto a los aniones, catorce pozos trazados dieron aguas con bicarbonato y seis son aguas con cloruros. Dado el entorno hidrogeológico (pozos someros en una zona de recarga y por lo tanto, un agua subterránea relativamente 'dulce') era de esperar el predominio del anión bicarbonato. La presencia de aguas con cloruros en este ambiente es anómala, aunque está directamente relacionada con la contaminación del agua subterránea somera en y alrededor de los sectores poblados del área piloto. Al combinar los resultados de cationes y aniones, el agua de catorce de los pozos se caracteriza como agua bicarbonatada-cálcico-magnésica, y seis se caracterizan como agua con clorurada-cálcico-magnésica.

El principal problema de la gestión de la calidad del agua subterránea se asocia con la falta de alcantarillado, la misma alcanza solamente al 30% de la población en Rivera y al 40% en Livramento, lo cual implica una carga sub-superficial importante de aguas residuales proveniente de unidades de saneamiento *in situ* localizadas en extensas áreas de la ciudad.

Tanto OSE como DAE tienen un grupo de pozos de agua con rendimientos mayores, superiores a los 100 m³/h en dos zonas restringidas al oeste

hora, localizados em zonas de proteção que estão a oeste das cidades, na região onde começa a aparecer a camada de basalto. Essas zonas, que estão fora da área urbana, são adequadas para perfurar mais poços e estabelecer áreas especiais de proteção para a extração de água subterrânea para o abastecimento humano. Trata-se de uma fonte potencial de abastecimento mais segura para as cidades que diminuirá sua dependência em relação a vários poços espalhados na zona urbana, que estão expostos a um maior risco de contaminação, mesmo que a rede de esgoto seja ampliada.

de las ciudades, ya en zonas donde el basalto comienza a estar presente. Dichas zonas, que se encuentran fuera de la zona urbanizada, son adecuadas para perforar más pozos y establecer áreas especiales de protección para la extracción de agua subterránea para abastecimiento humano. Esta opción representa una fuente potencial de abastecimiento más segura para la ciudad a la vez que reduciría su dependencia de numerosos pozos dispersos en la zona urbana expuestos a un mayor riesgo de contaminación, independientemente de las decisiones que se tomen sobre la ampliación de la cobertura de la red de alcantarillado.



Concórdia, Argentina – Salto, Uruguay.

Concordia, Argentina/Salto, Uruguay.

O Projeto-Piloto de Concórdia–Salto ocupa uma área de 500 km², localizada nas duas margens do Rio Uruguai, que marca a fronteira entre a Argentina e o Uruguai. Nessa área, ao contrário do que ocorre em outras áreas-pilotos de gestão, o Aquífero Guarani encontra-se entre 800 e 1.000 metros de profundidade, coberto por camadas basálticas vulcânicas. Suas águas subterrâneas apresentam condições de artesianismo e têm grande potencial geotérmico, com temperaturas entre 44° e 48 °C. O rendimento dos poços geotérmicos varia entre 100 e 300 m³ por hora, e a profundidade das perfurações chega a 1.400 metros.

Nessa zona, o SAG não é fonte significativa de água potável. O abastecimento público é feito principalmente por estações de tratamento que retiram água do Rio Uruguai. Além disso, há poços de pouca profundidade perfurados em depósitos do Terciário e do Quaternário e na parte superior fraturada das camadas de basaltos da Serra Geral, que atuam como fonte de água para abastecimento público e irrigação de pequena escala.

O projeto-piloto engloba a área mais povoada da fronteira entre a Argentina e o Uruguai. São cerca de 200 mil habitantes distribuídos igualmente em cada lado da fronteira. As principais fontes de renda da região são as indústrias vinculadas à citricultura e à horticultura. Salto, no Uruguai, é a região de balneários de águas termais mais desenvolvida do Mercosul, com mais de dez anos de desenvolvimento.

Em termos ambientais, o SAG está bem protegido pela espessa camada de basaltos e por seu alto grau de confinamento. Os principais problemas potenciais da região são:

- Interferência hidráulica entre poços vizinhos. Atualmente existem nove poços geotérmicos em uma zona relativamente restrita.
- Intrusão salina proveniente do sul e do sudeste, onde há poços de águas termais com elevada salinidade proveniente de formações pré-SAG.

El Proyecto Piloto de Concordia/Salto ocupa un área de 500 km² en ambas vertientes del Río Uruguay, el cual forma la frontera internacional entre Argentina y Uruguay. En contraste con las otras 'áreas piloto de gestión', aquí el Acuífero Guarani se encuentra debajo de 800 a 1.000 m de coladas basálticas volcánicas. El agua subterránea presenta condiciones de artesianismo y tiene marcado potencial geotérmico (temperaturas de 44 a 48 °C). El rendimiento de los pozos geotérmicos usualmente es de 100 a 300 m³/h, con profundidades de perforación de alrededor de 1.400 m.

En esta zona el SAG no constituye una fuente significativa de agua potable, pues el suministro se hace fundamentalmente a partir de potabilizadoras que se abastecen del Río Uruguay y se complementa con algunos pozos someros de depósitos delgados del Terciario y Cuaternario y la parte superior fracturada de los basaltos de la Serra Geral, que actúan como fuente de 'agua fría' para suministro público y riego en baja escala.

El Proyecto Piloto abarca la zona más poblada de la región fronteriza entre Argentina y Uruguay con alrededor de 200.000 habitantes, repartidos en forma aproximadamente igual en cada lado de la frontera. Las principales fuentes de ingresos en el área son las industrias citrícola y hortícola en expansión. Salto (Uruguay) es el área termal de balneario turístico más desarrollado en el MERCOSUR con más de diez años de desarrollo.

Ambientalmente el SAG se encuentra bien protegido por la espesa cubierta superior de basaltos y su alto grado de confinamiento, y en este caso los principales problemas potenciales del agua subterránea son:

- *interferencia hidráulica entre pozos vecinos (a la fecha existen 9 pozos geotérmicos en una zona relativamente restringida).*
- *riesgo de intrusión salina, proveniente del sur-sureste donde se presentan pozos que contienen agua termal con elevada salinidad de origen natural proveniente de formaciones pre-SAG.*

Alcalinidade mg/l	CE µS/cm	pH	T °C
226,2 - 265,2	600 - 3850	8,0 - 8,4	44 - 47
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
2 - 50	120 - 200	1,7 - 44	2,7 - 12
Cl mg/l	F mg/l	N-NO ³ mg/l	SO ⁴ mg/l
14,1 - 141,2	0,46 - 8,98	1,4 - 2,8	8,3 - 65,5

Os resultados dos diagramas Piper obtidos nos poços do SAG na região Concórdia–Salto mostram uma condição geoquímica consistente. Com relação à química dos cátions, as amostragens realizadas em oito poços revelaram águas sódicas. Com relação aos ânions, sete poços deram como resultado águas bicarbonatadas. A água na área-piloto do SAG caracteriza-se como uma água bicarbonatada sódica.

Entre os meses de março e abril de 2007 foram realizados testes hidráulicos em dois poços: no Poço de Zorraquin, em Concórdia, e no Poço de Remeros, em Salto. Durante os testes foram coletadas amostras para análise hidroquímica. A coleta foi feita durante e após os testes. As concentrações de alguns parâmetros de qualidade da água subterrânea, como condutividade, sulfato (SO₄²⁻), potássio (K), magnésio (Mg) e nitrato (NO₃²⁻), diminuíram após vinte dias de testes nos dois poços de descarga. Quando os testes foram interrompidos e os poços voltaram às taxas de descarga operacionais (recuperação), os parâmetros apresentaram uma tendência de retorno aos valores existentes antes dos testes.

Muitos dos balneários termais ainda não contam com uma gestão adequada da demanda e do uso da água. Portanto, devem-se desenvolver e disseminar práticas de gestão mais eficientes, incluindo a reciclagem da água para o cultivo de jardins exóticos, para o aquecimento de instalações hoteleiras e para a utilização em estufas e na aquicultura. Também é necessário construir depósitos seguros para as águas utilizadas, especialmente para as águas com salinidade

Alcalinidad mg/l	CE µS/cm	pH	T °C
226,2 - 265,2	600 - 3850	8,0 - 8,4	44 - 47
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
2 - 50	120 - 200	1,7 - 44	2,7 - 12
Cl mg/l	F mg/l	N-NO ³ mg/l	SO ⁴ mg/l
14,1 - 141,2	0,46 - 8,98	1,4 - 2,8	8,3 - 65,5

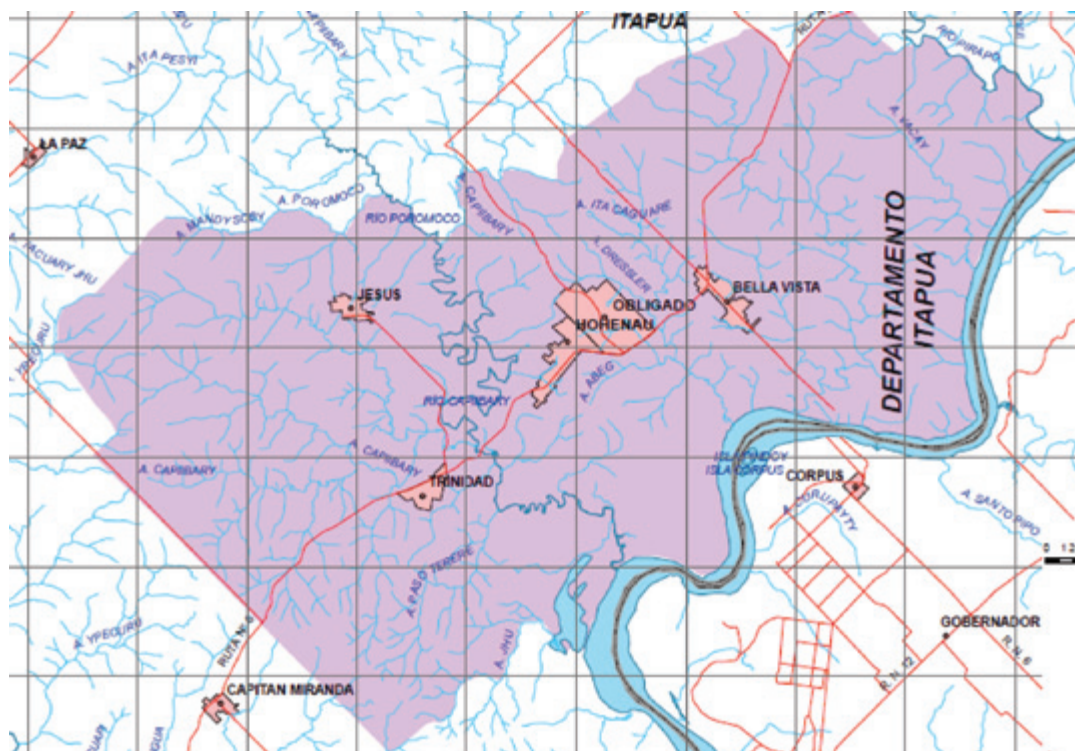
Los resultados de los diagramas Piper para los pozos SAG del área Concordia-Salto mostraron una condición geoquímica consistente. Con relación a la química de los cationes, las muestras trazadas para todos los 8 pozos mostraron aguas sódicas. En relación con los aniones, siete pozos dieron como resultados aguas bicarbonatadas. El agua dentro de esta área piloto del SAG se caracteriza como agua bicarbonatada sódica.

Entre los meses de marzo y abril de 2007 se llevaron a cabo ensayos hidráulicos en dos pozos: Zorraquin (Concordia) y Remeros (Salto), durante estos ensayos fueron recolectadas muestras para análisis hidroquímico, al principio, durante y al final de los mismos. Las concentraciones de algunos parámetros de calidad del agua subterránea como conductividad, sulfato (SO₄²⁻), potasio (K), magnesio (Mg), y nitrato (NO₃²⁻) disminuyeron luego de 20 días de ensayos en ambos pozos de descarga (Remeros y Zorraquin). Cuando los ensayos pararon y los pozos retornaron a las tasas de descarga operativas (Recuperación), esos parámetros tendieron a volver a los valores que tenían antes de los ensayos.

Muchos de los balnearios termales no cuentan aún con gestión adecuada de la demanda y del uso del agua, y por tanto hay necesidad de desarrollar y disseminar en la comunidad prácticas de gestión más eficiente del uso del agua geotérmica, incluyendo el reciclado del agua para cultivar jardines exóticos, calefacción de algunos espacios en las instalaciones hoteleras e invernaderos y acuicultura. También es necesario realizar un depósito final seguro

elevada. Além disso, devem-se combinar as águas termais e as águas subterrâneas encontradas em menor profundidade para usos diferentes dos existentes nos balneários.

de los efluentes (en particular si su salinidad es elevada) y combinar convenientemente el recurso termal con agua subterránea somera para usos no estrictamente de balneario.



Itapúa, Paraguai.

O Projeto-Piloto do Departamento de Itapúa engloba, predominantemente, áreas de atividade agropecuária. São 800 km² localizados no extremo sudeste do Paraguai, onde estão localizados os distritos de Bella Vista, Jesús, Trinidad, Hohenau e Obligado. A média anual de precipitação nessa área é de 1.600 milímetros por ano, e sua população é de aproximadamente 45 mil habitantes.

A área-piloto de Itapúa está localizada sobre uma sequência mesozóica de formações sedimentares cobertas por camadas descontínuas de basalto. Os basaltos, que fazem parte da formação vulcânica do Alto Paraná, estendem-se por meio da zona central e nordeste da área-piloto, mas não estão presentes na parte sul. Acredita-se

Itapúa, Paraguay.

El Proyecto Piloto del Departamento de Itapúa abarca predominantemente zonas agrícolas y ganaderas en 800 km² del extremo sureste de Paraguay, y abarca los distritos de Bella Vista, Jesús, Trinidad, Hohenau y Obligado, con una lluvia promedio de unos 1.600 mm/año. Hoy en día la zona cuenta con una población de unos 45.000 habitantes.

El Área Piloto de Itapúa se localiza sobre una secuencia Mesozoica de formaciones sedimentarias cubiertas por acumulaciones discontinuas de basaltos. Los basaltos, que se incluyen en la formación volcánica del Alto Paraná, se extienden a través de la parte central y noreste del área piloto pero están ausentes en el sector sur-central. La Formación Alto

que a Formação Alto Paraná pertença ao Período Cretáceo inferior e médio e que esteja relacionada com os basaltos da Serra Geral, no Brasil, e da Formação Arapey, no Uruguai.

A zona de afloramento do Aquífero Guaraní corresponde a 40% da área. O restante está coberto por rochas basálticas que formam uma camada de espessura variável. Cerca de sessenta poços foram registrados pelo Serviço Nacional de Água e Saneamento (Senasa) e inspecionados pelo projeto, em parceria com técnicos alemães, e pela Secretaria de Meio Ambiente (Seam). A profundidade dos poços varia entre 70 e 120 metros. Os que estão localizados nas áreas onde a camada de basalto é mais espessa chegam a 300 metros de profundidade. Alguns poços mais rasos apresentam sinais de contaminação incipiente por NO_3^- .

A maior parte da água subterrânea extraída nesta região do SAG é utilizada para abastecimento público e em atividades rurais e agrícolas. O principal produto da região é a soja, mas também há plantações de trigo, milho e erva-mate, entre outros. Consequentemente, o consumo de água pela atividade agrícola é moderado. O maior consumo das águas subterrâneas está na irrigação e na atividade pecuária (gado de corte e de leite). As áreas urbanas de Bella Vista, Hohenau, Obligado, Trinidad e Jesús, localizadas na área-piloto, são abastecidas por poços perfurados no SAG. O consumo doméstico e urbano é de aproximadamente 30 mil m^3 por dia. O consumo total – incluindo a irrigação, a pecuária e a indústria – pode chegar a 50 mil m^3 por dia.

Alcalinidade mg/l	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	T $^{\circ}\text{C}$
0 - 181,1	28 - 350	4,81 - 10,24	20,5 - 30
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
2,9 - 29,3	0,33 - 71	1,3 - 51,3	0,3 - 3,3
Cl mg/l	F mg/l	N- NO_3^- mg/l	SO_4^{4-} mg/l
2,5 - 29,3	0,03 - 0,6	0,16 - 21,93	2,3 - 6,1

Paraná se considera que pertenece al Cretácico temprano a medio, y se correlaciona con los basaltos de Serra Geral en Brasil y la Formación Arapey en Uruguay.

El afloramiento del Acuífero Guaraní constituye alrededor del 40% del área y el resto corresponde a rocas basálticas de espesor variable. Unos 60 pozos han sido registrados por el Servicio Nacional de Agua y Saneamiento (SENASA) e inspeccionados por el proyecto en curso de asistencia técnica alemana junto con la Secretaría del Ambiente (SEAM). La profundidad de estos pozos varía entre 70 y 120 m aunque llega a los 300 m en áreas cubiertas por espesas capas de basaltos. Unos cuantos de los pozos más someros muestran signos de contaminación incipiente por NO_3^- .

La mayor parte del agua subterránea extraída del SAG se utiliza para abastecimiento público y actividades rurales y agrícolas. La mayor parte del cultivo en el área es agricultura de secano (principalmente soja, pero también trigo, maíz, yerba mate, etc.), por ende el consumo de agua para fines agrícolas es moderado, sin embargo, existe un uso del agua subterránea para riego de cultivos y para granjas de producción animal (ganado vacuno y granjas lecheras, etc.). Las áreas urbanas de Bella Vista, Hohenau, Obligado, Trinidad y Jesús que se encuentran ubicadas en el área piloto toman el agua subterránea de pozos perforados en el SAG. El consumo doméstico y urbano se asume que es de 30.000 m^3 por día. Se podrían asumir 50.000 m^3 por día si se toman en cuenta otros usos (riego, producción animal, industrias).

Alcalinidad mg/l	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	T $^{\circ}\text{C}$
0 - 181,1	28 - 350	4,81 - 10,24	20,5 - 30
Ca mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	K mg/l
2,9 - 29,3	0,33 - 71	1,3 - 51,3	0,3 - 3,3
Cl mg/l	F mg/l	N- NO_3^- mg/l	SO_4^{4-} mg/l
2,5 - 29,3	0,03 - 0,6	0,16 - 21,93	2,3 - 6,1

A faixa de valores das principais variáveis analisadas durante a execução do projeto está na tabela supracitada.

Os resultados dos diagramas Piper para os poços de Itapúa apresentaram várias assinaturas geoquímicas. Com relação à química dos cátions, as amostragens de sete poços deram como resultado “águas misturadas”, e as amostragens de outros dez poços deram águas magnesianas. Foi feita a amostragem de um poço profundo perfurado no basalto e localizado em uma zona de águas cálcicas. Dois poços profundos do SAG sub-basáltico deram como resultado águas fortemente sódicas, com concentrações anômalas entre 68 e 71 mg/l. Com relação à química dos ânions, 12 poços deram como resultado águas bicarbonatadas e cinco, águas cloretadas. Dois poços da área intermediária apresentaram águas misturadas.

Ao combinar os resultados dos cátions e dos ânions, as águas de 11 poços caracterizam-se como água bicarbonatada-cálcica-magnesiânica e as águas de sete poços, como águas cálcicas-magnesianas-cloretadas. Os dois poços profundos sub-basálticos do SAG deram como resultado águas bicarbonatadas sódicas.

El rango de valores para las principales variables analizadas en el marco de la ejecución del Proyecto se muestra en la tabla adjunta.

Los resultados de los diagramas Piper para los pozos de Itapúa presentaron varias signaturas geoquímicas. Con relación a la química de los cationes, las muestras trazadas para siete pozos dieron aguas mezcladas y para diez, aguas magnésicas. Un pozo profundo en basalto, se trazó justo dentro de la zona de agua cálcica. Por otro lado dos pozos profundos del SAG sub-basálticos dieron como resultado aguas fuertemente sódicas debido a concentraciones anómalas de los valores de 68 y 71 mg/l. Con respecto a la química de aniones, doce pozos dieron como resultado aguas bicarbonatadas y cinco, aguas cloruradas, con dos pozos en la zona “mixta” entre estas dos facies.

Al combinar los resultados de los cationes y los aniones, el agua de once de los pozos se caracteriza como agua bicarbonatada-cálcica-magnésica y el agua de siete pozos como agua cálcica-magnésica-clorurada. Los dos pozos profundos, sub-basálticos del SAG mencionados más arriba, dieron como resultado las facies bicarbonatadas-sódicas.

