



El denominado **Sistema Acuífero Guaraní** (SAG) es uno de los reservorios de agua subterránea más grandes del mundo, se encuentra en el subsuelo de un

área de alrededor de 1.100.000 kilómetros cuadrados (superficie mayor que las de España, Francia y Portugal juntas), por lo que también en un momento se lo denominó el acuífero gigante del Mercosur.

Agua subterránea: el recurso invisible

El desarrollo económico y el crecimiento de la población están instalando al agua subterránea –el *recurso invisible*– en las primeras planas de la prensa. En efecto, del agua subterránea dependen para su abastecimiento diario más de dos mil millones de personas, al igual que gran parte de la agricultura irrigada y un sinnúmero de industrias en todo el planeta.

La contaminación del agua subterránea y la escasez de agua tratada afectan, especialmente en los países en vías de desarrollo, a los sectores más pobres que a menudo no pueden manejar los niveles del agua subterránea que se profundiza o encontrar fuentes alternativas cuando ese recurso se contamina.

La aceleración de la tasa de uso de este recurso en las últimas décadas ha dado lugar a grandes beneficios sociales y económicos por tratarse en general de un tipo de abastecimiento barato, confiable y de alta calidad. Al tiempo que se desarrolla ese proceso de uso creciente del agua subterránea es importante tener en cuenta que su sustentabilidad supone asegurar su disponibilidad en cantidad y calidad, lo que a la vez hace necesario multiplicar los esfuerzos orientados a producir el conocimiento indispensable para contribuir a lograr una gestión y protección adecuadas de los sistemas acuíferos.

Características del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní

El Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (Proyecto Guaraní o PSAG) fue una iniciativa de los gobiernos de la Argentina, el Brasil, el Paraguay y el Uruguay cuyo diseño inicial se llevó a cabo entre 2000 y marzo de 2003. En él participaron las instituciones responsables de la gestión de los recursos hídricos de los cuatro países y universidades de la región que, junto al Banco Mundial y la OEA, gestionaron el apoyo del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), con el propósito preacordado de proteger el SAG. Iniciada su ejecución a principios de 2003, finalizó en enero de 2009. Los organismos responsables de los países, a través de un Consejo Superior, fueron las cancillerías y las secretarías de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Se contó también con el apoyo de la Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) y el Servicio Geológico de Alemania. Los estudios técnico-científicos y otras actividades diversas realizadas fueron licitadas y contratadas a terceros bajo la coordinación y supervisión de la OEA y la Secretaría General del PSAG.

Son múltiples los aspectos que intervienen en la generación y explotación del recurso, por lo que su conocimiento y evaluación han sido encarados con un enfoque multidisciplinario

El PSAG fue estructurado en siete componentes básicos lógicamente interrelacionados: 1) Estudios Técnicos; 2) Marco de Gestión; 3) Participación Pública y Educación Ambiental; 4) Seguimiento del Proyecto; 5) Proyectos Piloto (en los cuatro países intervinientes); 6) Hidrotermalismo, y 7) Administración y Coordinación del Proyecto. Este último se realizó a través de la OEA y una Secretaría General de gerenciamiento que fue constituida con sede en Montevideo.

Los acuíferos son cuerpos de rocas permeables que contienen agua subterránea explotable, que se infiltra con diferentes velocidades, y están conectados al ciclo hidrológico.

El clima actual de la región del SAG se caracteriza como húmedo o subhúmedo con precipitaciones anuales entre 1200 a 1500mm. Los balances hídricos de la porción atmosférica del ciclo hidrológico han mostrado que en la mayor parte del área de ocurrencia del SAG existe un excedente anual de 300mm, llegando a 600mm en la región Sur (Paraguay, Argentina y Rio Grande do Sul). Ese excedente es el que escurre sobre la superficie terrestre y parte también alimenta los acuíferos.

El SAG, de carácter transfronterizo, está localizado en sectores del subsuelo de la Argentina, el Brasil, el Paraguay y el Uruguay, coincidentemente con parte de la cuenca hidrográfica del Plata, extendiéndose desde la cuenca geológico-sedimentaria del Paraná hasta la cuenca Chacoparanaense. Se ha desarrollado entre los paralelos 16° y 32° Sur y los meridianos 47° y 60° Oeste. Los estudios recientes realizados ajustaron el área de extensión a 1.084.063,90 km². Por sobre el área del SAG se ubican alrededor de 1.500 municipios de los cuatro países, con una población total de 23.500.000 habitantes, de los cuales alrededor de 9.000.000 se abastecen de él. El agua es utilizada principalmente para la provisión humana y de industrias, y en menor grado para explotación como termas. El país que más lo utiliza es Brasil: allí se abastecen de agua subterránea del SAG, total o parcialmente, entre 300 y 500 ciudades, con miles de pozos de explotación.

En el Brasil, la distribución del uso del agua, a pesar de prevalecer para el uso público, se produce de manera más diversificada; en la Argentina no existe tal diversificación, los pozos registrados se usan mayormente para la explotación del agua con fines recreativos. En el Uruguay, salvo en Salto, y en el Paraguay, el destino final del agua es en más del 90% para abastecimiento de centros urbanos.

Estudios técnicos e hidrotermalismo

Los estudios técnicos vinculados al conocimiento del acuífero y de su hidrotermalismo representan solamente dos de las siete líneas de trabajo encaradas. Las tareas realizadas en relación a estas incluyeron una serie de actividades llevadas a cabo por diversas empresas adjudicatarias, que se sintetizan en el siguiente listado:

- Implementación de la Base de Datos Hidrogeológica y Sistema de Información del SAG (SISAG)
- Estudios Hidrometeorológicos e Hidrológicos
- Geología de campo y laboratorio
- Prospección geofísica
- Inventario y muestreo de perforaciones de la región
- Estudios hidrogeológicos-hidroquímicos e isotópicos
- Diseño de una red de monitoreo regional
- Realización de mapas temáticos
- Desarrollo de modelos numéricos regional y locales (en las cuatro áreas piloto).

Geología del SAG

Uno de los principales objetivos de un estudio geológico es determinar un modelo tridimensional del subsuelo, que permita interpretar la distribución horizontal y vertical de las distintas unidades y tipos de rocas y sedimentos.

El objetivo principal de un estudio hidrogeológico es determinar qué parte de ese modelo tridimensional está saturado de agua, cuál es su calidad, dirección de flujo y volumen.

La de Paraná (y la Chacoparanaense incluida en ella) es una cuenca geológica intracratónica, ubicada entre dos cratones o áreas continentales estables, cuya edad es Pérmica Media a Triásica con una extensión gigantesca, desde Goiás, en Brasil, hasta el norte del Uruguay y desde San Pablo hasta el Paraguay oriental; su borde SO tiene como límite las sierras pampeanas de Argentina (figura 1b). Esta gran cuenca aporta cuerpos arenosos porosos y permeables tanto en sus flancos como en el centro de la cuenca.

Por encima de la misma, y mediando una discordancia regional, se distribuye en toda la región un manto casi continuo de areniscas principalmente eólicas, de edad juró-cretácica, que es el principal reservorio, donde se alojan las aguas del Acuífero Guaraní.

Toda esta variedad de depósitos arenosos, distribuidos algunos localmente, otros regionalmente, han sido cubiertos por una espesa y extensa cobertura de coladas volcánicas del Cretácico denominada *Formación Serra Geral*. Además, dentro de las vulcanitas se reconocen intercalados depósitos arenosos eólicos que se preservaron dentro del campo volcánico. Estas intercalaciones pueden ser reservorios locales de agua y se los conoce como intertraps o *Formación Solari* en la Argentina.

Los estudios geológicos y petrológicos de laboratorio han permitido caracterizar y correlacionar las distintas unidades sedimentarias atribuibles al Guaraní en los cuatro países. Los valores medios de porosidad, determinada por la relación entre los espacios intergranulares vacíos y el volumen total de roca, fue de 25 a 27%; y los de permeabilidad al gas, que mide la velocidad de transmisión de un fluido a través de la roca, fue de entre 400 y 700 miliDarcy. La distribución de frecuencia de las muestras analizadas indica una similitud en el comportamiento entre las formaciones Botucatú, Misiones y Tacuarembó (que son los diferentes nombres asignados a las unidades geológicas del SAG, en Brasil, Argentina y Paraguay, y Uruguay, respectivamente), lo que ha sido también confirmado en su caracterización mineralógica. Esta continuidad de rasgos indica que esta gran unidad arenosa regional y prebasáltica se ha formado en un mismo tipo de ambiente de sedimentación eólico, probablemente un gran desierto, con sectores intercalados fluvio-eólicos que señalan los escasos lugares por donde corrían cursos fluviales. En estos intervalos no se ha encontrado elemento micropaleontológico alguno.

El SAG, entonces, está relacionado geológicamente a capas de areniscas que se han depositado durante el Mesozoico (desde el Triásico hasta el Cretácico inferior) con edades entre 200 y 132 millones de años. Se determinó que está integrado específicamente por las formaciones Piramboia y Botucatú en el Brasil norte y centro; Botucatú, Guará, Santa María y Caturrita en el Brasil sur; Tacuarembó en el Uruguay y parte de la Argentina, y Misiones en el Paraguay y parte de la Argentina.



Figura 1b. Ubicación del área del SAG en los cuatro países y extensiones. (Fuente LEBAC, PSAG)

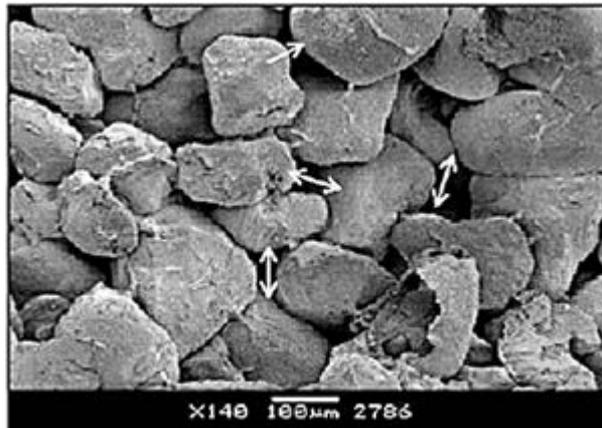


Afloramientos de areniscas en las formaciones Botucatu (Brasil), Misiones (Argentina y Paraguay) y Tacuarembó (Uruguay), mostrando estratificación en paleodunas. Fotos PyT.
A la izquierda: fotografía de granos de cuarzo redondeado de las areniscas del SAG.
Fuente LCV

Las cuencas sedimentarias que conforman el SAG incluyendo los depósitos basálticos de su techo están ubicadas en zonas tectónicamente estables, como son los antiguos macizos geológicos levemente plegados. Su fracturación ha sido heredada del basamento cristalino y reactivada más modernamente, principalmente luego de la extrusión volcánica del Cretácico. Esto le da al SAG una complejidad adicional, debido a la presencia de múltiples fracturas de distinta envergadura, que se reconocen a distintas escalas y que afectan el flujo del agua.

En la región sur del SAG, donde se han tomado datos, las rosas de direcciones indican que los vientos predominantes soplaban desde el cuadrante SO hacia el NE durante la depositación de los sedimentos y conformaron dunas de variado tipo. El Arco Río Grande-Asunción (Arco RG/AS) constituyó en esas épocas un elemento positivo, que afloraba en la superficie, por lo que originó la división norte-sur de la entonces cuenca sedimentaria jurásica, en la que hoy se encuentra alojado el SAG.

La geometría del sistema acuífero se reconstruyó con el trazado de isópacas, que son las líneas que en los mapas



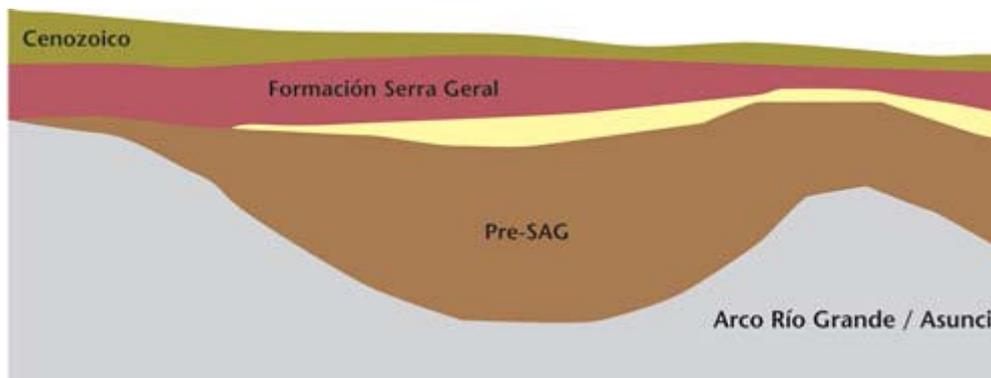
Microfotografía, obtenida con MEV, de areniscas del miembro superior de la formación Tacuarembó, exhibiendo excelente porosidad intergranular (flechas amarillas), y excelente conexión entre poros (LCV, 2008).

unen puntos de igual espesor. La unidad arenosa SAG alcanzó espesores de hasta 800m y, en términos generales, los sectores más importantes, con espesores de más de 500m, ocurren principalmente

a lo largo de un eje NNE-SSO, subparalelo a los actuales ríos Paraná y Uruguay y casi concordante con el eje deposicional de la cuenca geológica de Paraná. A su vez, los mayores espesores de las rocas y sedimentos post SAG, o sea el techo que lo cubre, son de hasta 1900m, siendo más frecuentes valores entre los 1400 y 1000m en los sectores más profundos del SAG.

Gran parte del SAG presenta temperaturas más elevadas que la media anual de la zona, pudiendo alcanzar hasta 60-70°C en tanto que solo un 10% de su extensión corresponde a áreas de afloramientos de las areniscas con temperaturas propias del agua subterránea en cada zona. Los sectores más profundos presentan artesianismo o surgencia natural de las aguas.

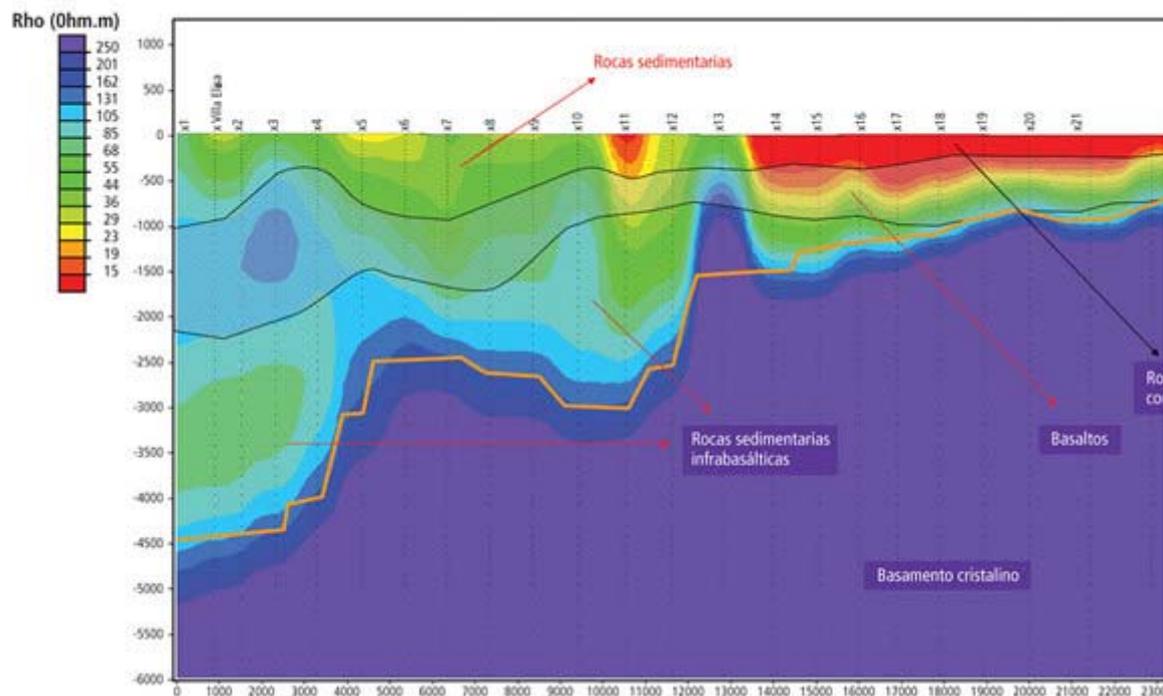
Los estudios geofísicos como los magnetotelúricos (MT) permiten reconstruir la estructura más profunda del acuífero, aquella que no es posible alcanzar con perforaciones, y conocer los volúmenes y la distribución de las rocas que alberga.



Esquema subregional de un corte del subsuelo. LEBAC. 2008

Los sectores geotermales del acuífero Guaraní -cuencas geológicas de Paraná y Chaco paranaense adquieren su temperatura debido a la transferencia del calor natural de la corteza terrestre, que aumenta según el gradiente geotérmico promedio mundial de $3,3^{\circ}\text{C}$ cada 100 metros de profundidad.

En consecuencia, el agua que se infiltra desde la superficie va aumentando su temperatura a medida que desciende.



Prospección geofísica (AMT/MT) aplicada al acuífero guaraní, traza Colón-Villa Elisa. Fuente Geodatos SRL

El Arco de Ponta Grossa, en el estado brasileño de Paraná, es una estructura geológica profunda (a lo largo de los arcos las rocas más antiguas se hallan más cerca de la superficie del terreno), asociada a importantes 'enjambres' de diques y filones capa básicos con orientación NO, teniendo también incidencia general en el comportamiento del flujo de las aguas subterráneas del SAG. A diferencia del Arco de Río Grande, su reactivación está asociada con los procesos tectónicos del Mesozoico.

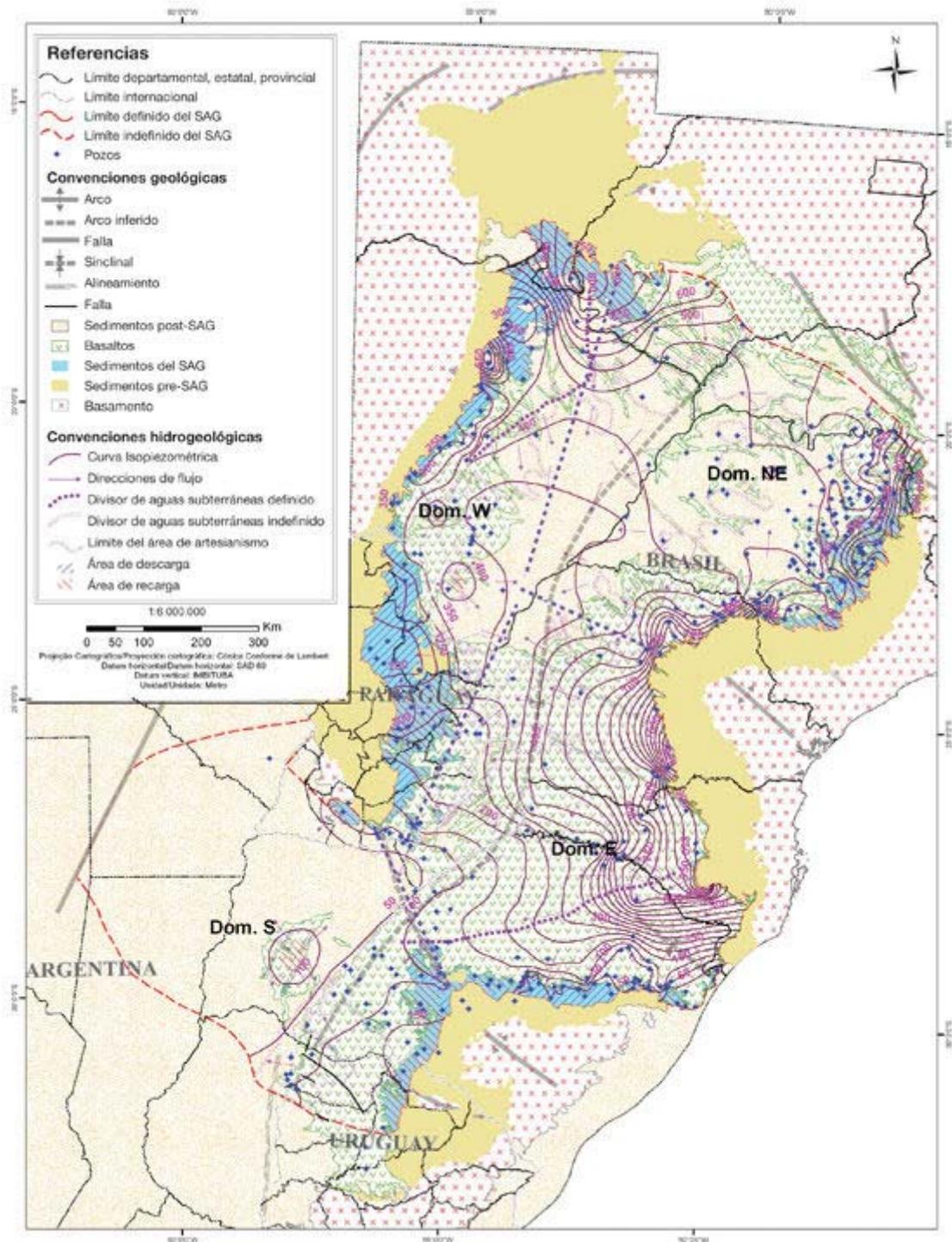
El Proyecto Guaraní ha determinado el límite occidental del SAG basado también en las características geológico-petroológicas de las unidades estratigráficas del subsuelo. Sobre esta base se define que el mismo se extiende hacia el oeste en la Argentina (ver mapa potenciométrico) hasta el Alto Pampeano-Las Breñas, límite este de la provincia de Santiago del Estero. Se determinó fehacientemente mediante geofísica el gran escalón estructural Colón-Villa Elisa y la existencia de la fosa geológica profunda de Misiones, sus posibilidades y vinculaciones con el gran espesor Paleozoico-Mesozoico Paraense mayor (*calha central*, o fosa) de Brasil, y la ausencia del arco geológico (elevación de rocas más antiguas en el subsuelo) de Rio Grande do Sul en la fosa de Misiones, entre otros elementos tectónicos profundos investigados.



Arriba: contacto discordante entre SAG y basaltos. Localidad: Araracuara, San Pablo, Brasil.

Abajo: formación Botucatu.





Mapa potenciométrico del SAG en escala regional. Las curvas unen puntos de igual presión de agua. Indica las principales direcciones de flujo.

Hidrogeología del SAG

El mapa hidrogeológico regional, y su interpretación o modelo conceptual, permitió establecer el diseño de un sistema de flujo, en el que se reconocen cuatro grandes áreas hidrodinámicas que indican el movimiento del agua subterránea. Estas se ubican en los cuadrantes NE, E, O, y S. Todo el flujo regional de las aguas subterráneas de los tres Dominios NE, E y O (ver mapa potenciométrico de niveles de agua subterránea), que no son descargados en el borde oeste, terminan convergiendo en el eje central de la cuenca a lo largo del río Paraná, formando una zona de convergencia de flujo que finaliza conectando la porción norte del SAG al último dominio, localizado al sur de la Dorsal Asunción-Río Grande. El Arco de Ponta Grossa ha sido un elemento retardador del libre flujo desde San Pablo hacia el sur (ver mapa potenciométrico). Las principales direcciones de flujo subterráneo, durante muchos miles de años, han sido obligadas a torcer hacia el oeste y luego retomar su dirección regional hacia el sur. En el área del estado de San Pablo hay una concentración de aguas subterráneas más antiguas. En territorio argentino, a pesar de la escasa cantidad de datos confiables, se evidencia la existencia de un área local de recarga asociada al Alto de Mercedes, en la provincia de Corrientes (ver mapa potenciométrico).

El Mapa Hidrogeológico del SAG contiene los avances sustanciales logrados en el conocimiento, especialmente en la definición de áreas de recarga y descarga y comportamiento de grandes sistemas de flujo subterráneo asociados a características hidroquímicas e isotópicas particulares.

Hidroquímica e isotopía del SAG

Los acuíferos presentan diferente composición química de acuerdo con su distribución dentro de la cuenca. Generalmente es posible identificar la presencia de tres facies hidroquímicas bien definidas:

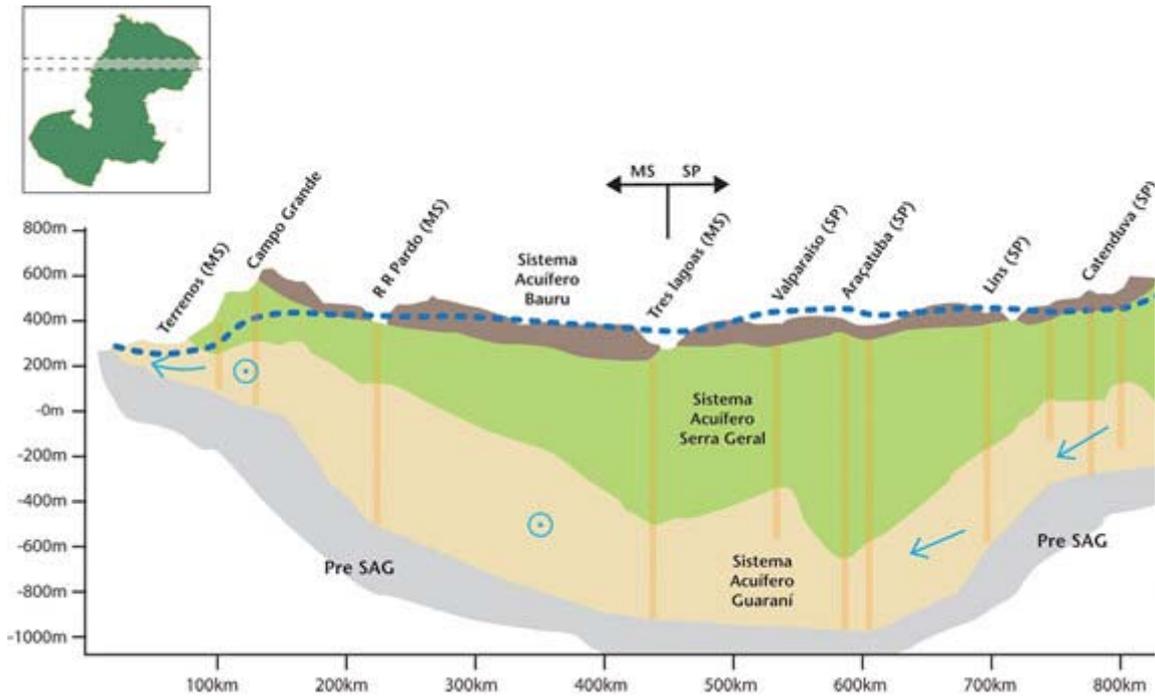
- a) aquellas ubicadas en el área aflorante;
- b) aquellas ubicadas a algunas decenas o centenares de kilómetros de distancia de las áreas aflorantes, y
- c) aquellas ubicadas en el sector central o más profundo de la cuenca, donde se presenta termalismo más elevado.

Regionalmente presentan las siguientes características sin descartar particularidades:

- La primera facie de agua –áreas aflorantes– es de tipo bicarbonatada cálcica (con pH ácido, 5 a 6), los cationes se presentan en el siguiente orden: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} .
- La segunda facie es de tipo bicarbonatada sódica, con pH neutro o ligeramente alcalino (7,4 a 7,8). En este caso los aniones y cationes principales son Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , y HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} .
- La tercera facie –profundas– es de tipo bicarbonatada clorurada-sulfatada-sódica, con pH de ligeramente alcalino a alcalino (7,8 a 9), determinado por los altos contenidos de Na^+ y Ca^{2+} , que junto con los Cl^- y SO_4^{2-} son los principales componentes del agua en esta zona.

Este modelo evolutivo es a grandes rasgos el modelo hidrogeoquímico universal.

En el caso de SAG, puede considerarse una zonación geoquímica diferenciada en por lo menos cuatro partes evolutivas, que se identifican como bicarbonatadas-cálcicas, bicarbonatadas-sódicas, sulfatadas-cloruradas-sódicas y cloruradas-sódicas. Se confirmó en ciertos sectores del SAG la presencia de arsénico y otros elementos con valores por encima de los estándares de potabilidad, que podrían provenir de las unidades del subsuelo más antiguas del pre SAG (permotriásicas), y con más elevada salinidad y presencia de elementos contaminantes naturales (arsénico, flúor, otros).



Corte esquemático del subsuelo en el norte del SAG. La línea punteada indica las alturas hasta donde asciende el nivel del agua del SAG por perforaciones. La surgencia está condicionada por la topografía.

El aporte profundo de aguas cloruradas permotriásicas puede adicionar características de mezcla en muchos sectores más someros.

Los principales procesos geoquímicos que confieren las características hidroquímicas a las aguas del SAG son: disolución de carbonatos próximos a las zonas de recarga y en la región de menor confinamiento, a fin del intercambio catiónico (Na por: Ca, Mg, K); siguiendo en dirección a la zona más confinada del SAG ocurren procesos que llevan a la precipitación de carbonatos, intercambio catiónico (Ca y Mg por Na) y mezcla con aguas saladas más profundas, a través de flujos verticales ascendentes.

Asimismo, se ha reportado la presencia de tres géneros de microalgas en los resultados de los muestreos en pozos termales: *Oscillatoria*, *Anabaena* y *Navícula*, además de la presencia del alga *Chlorella*. Este último género necesita luz para reproducirse y sobrevivir, siendo su hábitat natural los ambientes superficiales, por lo que se descarta la posibilidad de que la composición algal encontrada sea originaria del SAG. Esta evidencia sugiere la posibilidad de contaminación del agua y el género *Chlorella* podría ser utilizado como bioindicador de la calidad del agua.

El estudio isotópico puso en evidencia una gran variación en los valores del isótopo ^{18}O en la porción norte del SAG, indicando que las aguas habrían sido recargadas en condiciones más húmedas y frías que las actuales. Este hecho es validado por dataciones que indican la posibilidad de recargas de una época más antigua que 35.000 a 40.000 años para estas aguas, durante la última glaciación.

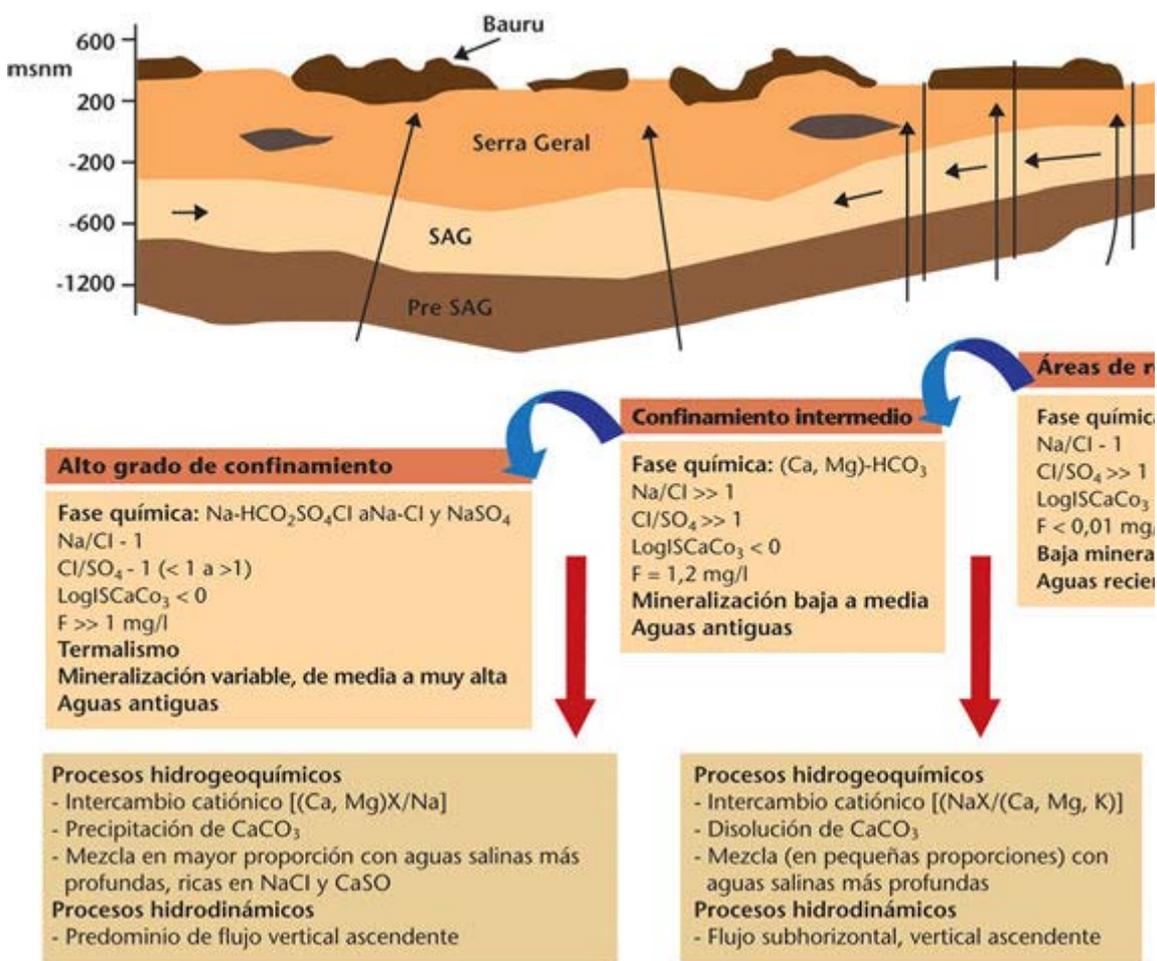
Asimismo, el estudio isotópico de las aguas permitió identificar el origen de aguas saladas de la región termal argentina no Guaraní de Entre Ríos. Las relaciones isotópicas de ^{18}O y ^2H (oxígeno 18 y deuterio) indicarían que esas aguas tienen origen distinto a las aguas del SAG proveniente de los pozos perforados en territorio uruguayo o argentino. Ese hecho

también corrobora las conclusiones y observaciones del modelo geológico propuesto para el límite sudoccidental del SAG.

Hay muchos sectores donde las aguas subterráneas antiguas se encuentran en zonas no muy alejadas de las áreas de recarga, lo cual indicaría especialmente una combinación de bajos gradientes hidráulicos (velocidades de flujo muy lentas) y bajas tasas de recarga.

Los datos de S-34 mostraron que el aumento de salinidad observado en partes profundas del acuífero no responde a sales de origen marino y podría ser atribuido a un aporte de sales de formaciones subyacentes al SAG constituidas por sedimentitas más antiguas, formadas en las márgenes de una transgresión marina.

En relación con una posible descarga del acuífero Guaraní a los humedales de los esteros del Iberá, provincia de Corrientes, los datos hidroquímicos e isotópicos (especialmente tritio) en principio descartaron esta hipótesis.



Modelo propuesto de evolución hidrogeoquímica (modificado de Manzano & Guimaraens, 2008)

Usos del agua del SAG y reservas

En la cuenca del río Paraná, las disponibilidades hídricas medias anuales (excesos) varían entre los 350 y 400mm, mientras que los déficits medios anuales presentan valores entre 150 y 220mm. Las mayores magnitudes de disponibilidades hídricas superficiales medias

anuales (excesos) se registran en la cuenca del río Iguazú y el río Uruguay con valores comprendidos entre 500-650mm, en tanto que los déficits medios anuales no superan los 90mm.

La gran parte de los pozos del SAG de la base de datos hidrogeológicos (BDH) registran caudales inferiores a 50m³/h. Si bien un cierto número llega a producir entre 150 a 300m³/h, la mayor parte de los pozos presenta caudales específicos (caudal obtenido por cada metro de depresión), menores a 6m³/h/m, siendo muy comunes los valores de 2m³/h/m, indicando un nivel medio a bajo de productividad.

El Brasil es el que más explota los recursos abastecidos por el SAG, con el 93% del volumen extraído por año, consumiendo casi 1km³/año (un kilómetro cúbico = mil millones de metros cúbicos = un billón de litros).

El abastecimiento público es el principal destino del recurso hídrico captado por los pozos en el área del SAG. Las evaluaciones económicas y financieras realizadas para el mismo en cada uno de los proyectos piloto y señalan que con caudales de 75m³/h en pozos poco profundos es muy rentable económica y financieramente. En cada caso es necesario revisar las tarifas de este servicio, ya que habitualmente son bajas y se ubican por encima de los costos marginales de largo plazo. En cuanto a los usos termales no tradicionales, queda aún un interesante campo a investigar en detalle, y sujeto a condiciones externas de costos y mercado en las áreas de recarga en afloramientos para un total almacenado (reservas totales) de alrededor de 30.000km³. Las reservas explotables (comprenden parte de las reservas compresivas y las drenables, ver esquema conceptual) se han calculado de la siguiente manera: sobre la base de una depresión general del nivel piezométrico de todo el SAG de 400m con respecto a los niveles estáticos (niveles de agua subterránea sin explotación), vamos a tener disponible un total de 2000km³ de agua (solo 6,5% de la reserva total). Estos valores permitirían una extracción general continua distribuida (no concentrada), de alrededor de 200km³ por año durante diez años, por ejemplo. Hipotéticamente, en ese sentido se tendrían que utilizar más de 60.000 grandes pozos operando simultáneamente con altos caudales y distribuidos homogéneamente (no concentrados) en toda la región.

El volumen total de agua del acuífero es de 30.000km³, aunque las reservas explotables están dentro de los 2000km³/año (a título comparativo: el módulo aproximado del río Paraná es de 80km³/año). La recarga general del SAG en los sectores aflorantes de los cuatro países es de solo 5km³/año.

Los modelos numéricos realizados de los cuatro estudios piloto permitieron simular escenarios futuros con mayores explotaciones o cambios de ubicación. Se han determinado descensos (pérdida de presión hidrostática) y extensiones basados en la simulación de los niveles del agua subterránea interferidos entre sí (por influencia entre los pozos). En el área de Concordia-Salto, por ejemplo, cuando se agregan en el modelo matemático siete nuevos pozos a los existentes, el macrocono de depresión (suma de los efectos de los conos de depresión individuales de cada pozo al estar extrayendo agua) se extiende más lejos de los límites del área piloto, alcanzando unos 40km de extensión a ambos lados del río Uruguay (frontera entre el Uruguay y la Argentina) y profundidades de conos de depresión de más de 10m de nivel dinámico dentro de las ciudades. Un ensayo hidráulico de larga duración realizado en un pozo termal en el piloto permitió determinar una tendencia manifiesta al cambio en las relaciones hidroquímicas e isotópicas (carbono 14) del agua ante una explotación continua e intensa y una leve tendencia a la disminución de la temperatura; durante las dos semanas de extracciones se evidenció la paulatina entrada al pozo de aguas termales con menores tiempos de residencia, de iniciales con más de 40.000 años de antigüedad a relativamente más recientes.

En el área piloto de Ribeirão Preto-San Pablo se determinó, sobre la base del modelo, que la mayoría (cerca del 74%) de la recarga neta total (alrededor de 704.870m³/día) del acuífero dentro del área de estudio se descarga a través de pozos. Los resultados de la modelación, basados en las tasas de producción sostenible de agua subterránea del SAG que

abastece a la ciudad, determinan que la misma alcanzarían solo hasta el año 2030 en las condiciones actuales.

El modelo regional indica, para un escenario de cien años del SAG, que más allá de los 300km de distancia no se detecta efecto alguno de explotaciones. El borde occidental de afloramiento del SAG 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.

Lo que a escala regional, en principio, se insinuaba hidrogeológicamente como una única cuenca con un solo gran reservorio y un manto basáltico único, y muy poco deformada, a la luz de los nuevos conocimientos se complejiza con frecuentes heterogeneidades, especialmente cuando se la considera y estudia con mayor detalle. A nivel más local, entonces, son necesarios estudios al menos en escala 1:50.000, o a lo sumo 1:100.000, para definir los alcances más precisos de las interferencias, conexión de flujos y mayores riesgos de transmisión de contaminación, entre otras problemáticas. Esto conlleva, además, la aplicación de técnicas más probadas y especializadas y un trabajo interdisciplinario que supera la mera actividad profesional de intervención o consultoría individual para resolver problemáticas en el SAG.



Formación Tacuarembó donde se observa una sección del SAG cubierta por la capa basáltica, que le confiere su aspecto mesetiforme.

Amenazas y riesgos en el SAG

La gestión sustentable de un recurso hídrico como este tanto geotermal como no termal tiene que evitar los siguientes aspectos producto de una mala explotación y/o de falta de protección, a saber:

- reducción de caudales y niveles;
- reducción de presión hidrostática;
- reducción de temperatura;
- aumento de la concentración salina;
- contaminación antrópica en áreas de recarga.

Algunos sectores del SAG corren riesgos determinados principalmente por:

a) su explotación más allá de lo sostenible, es decir, por la extracción de una cantidad de agua subterránea mayor que la que el acuífero repone permanentemente, y
b) su contaminación, dada la deficiente construcción de perforaciones y/o la carencia de sistemas de tratamiento de aguas y residuos por vertidos industriales en áreas de recarga, sea por líquidos residuales domésticos, o por agroquímicos e insecticidas en zonas rurales. Considerando que la descontaminación es un proceso de muy compleja ejecución y de altísimo costo financiero, es necesario trazar líneas de acción orientadas a su protección en el marco de políticas de desarrollo sostenible.

Con el fin de evaluar el impacto que produce la dinámica de ocupación humana en el área, se analizaron los resultados de los mapas multisequenciales de uso de suelo a través de imágenes satelitales. Las clases que mayores cambios presentaron fueron el bosque denso y el bosque degradado, los que fueron tomados como una sola clase.

Se observó que en el período 1973-1980 constituían un 42% de la superficie del Acuífero y por el avance de las actividades agropecuarias se redujeron a un 8% en la actualidad.

Las incertidumbres de los modelos de cambio climático presentan diferentes escenarios futuros para la región del Guaraní. El más desfavorable supone un aumento de temperatura media global de 3°C hacia el año 2080. En ese caso, la disponibilidad de agua en el suelo anualmente se vería sustancialmente disminuida en la zona noroccidental del SAG, donde los déficits se incrementarían marcadamente, afectando especialmente la zona del territorio paraguayo y del brasileño entre los 15° y 20° S y entre 49° y 57° O.

Principales logros generales del PSAG

Uno de los aspectos fundamentales del desarrollo del proyecto fue la manera en la cual se generó la información. Primó en todas las actividades la participación de la sociedad local, lo que se canalizó en distintas formas, así como también la de los profesionales del sistema de C y T de los países del Mercosur, que hicieron un seguimiento directo e indirecto de las actividades, involucrándose en los estudios. También la actividad de las empresas contratadas se llevó a cabo sobre la base de la participación activa de un 75% de profesionales locales, generándose un importante volumen de información calificada.

Los principales logros generales podrían resumirse en:

- Aumento de información y conocimiento con un control adecuado de su calidad, y administración de la misma vía base de datos y sistema de información.
- Oportunidad de difusión a tiempo real, vía internet, de la marcha y los productos del proyecto (ejemplo de acceso a la información de la sociedad en general).

- Inserción del SAG y del proyecto en la agenda de los países y en la opinión pública.
- Fortalecimiento de la concientización sobre la necesidad de la gestión sustentable del agua subterránea en general y del acuífero Guaraní en particular.
- Ejemplo de referencia válida para otros emprendimientos similares y desafío a nuevas formas técnico-socioeconómicas-institucionales para los estudios y gestión de este recurso.
- Asentamiento y fortalecimiento de recursos humanos locales especializados en la región y nuevas alianzas institucionales y personales.
- Generar vínculos exitosos entre la actividad privada y la académica.
- Concretas experiencias participativas locales (pilotos) del SAG para un apoyo,



seguimiento y difusión del mismo y fortalecimiento de la gestión.

Empresas y universidades participantes del PSAG

Empresas. SNC Lavalín International (Canadá), LCV (Argentina), Geodatos SRL (Argentina), PyT Consultora SRL (Argentina), Proinsa SRL (Argentina), DH SRL (Brasil), Consorcio Guaraní (Tahal Consulting Engineers Ltd., Israel; Seinco SRL, Uruguay; Hidroestructuras SA, Argentina; Hidrocontrol SA, Paraguay; Hidroambiente SA, Brasil).

Universidades. Universidade Estadual Paulista (LEBAC); Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Instituto de Hidrología de Llanuras); Universidad Politécnica de Catalunya; Universidad de Waterloo, Canadá.

LECTURAS SUGERIDAS

ARAUJO LM, FRANÇAAB, POTER PE, 1999, ‘Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA’, *Hydrogeology Journal*, 7: 317-336, Heidelberg.

GASTMANS D, CHANG HK, 2005, ‘Avaliação da hidrogeologia e hidroquímica do Sistema Aquífero Guaraní (SAG) no Estado de Mato Grosso do Sul’, *Revista Águas Subterráneas*, 19, 1:35-48, São Paulo.

ROSA FILHO EF da, HINDI EC, ROSTIROLLA SP, FERREIRA, FJF, BITTENCOURT, AVL, 2003, ‘Sistema Aquífero Guaraní. Considerações Preliminares sobre a Influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das Águas Subterráneas’, *Revista Águas Subterráneas*, 17: 91-111, São Paulo.

ROSSELLO E, VEROSLAVSKY G, de SANTA ANA H, FÚLFARO VJ, FERNÁNDEZ GARRASINO CA, 2006, ‘La Dorsal Asunción-Río Grande: un Altoplano Regional entre las cuencas Paraná (Brasil, Paraguay y Uruguay) y Chacoparanense (Argentina)’, *Revista Brasileira de Geociências*, 36:181-196, São Paulo

SCHERER CMS, 2000, ‘Eolian Dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in Southernmost Brazil: Morphology and Origin’, *Sedimentary Geology*, 137:63-84.

SRACEK O, HIRATA R, 2002, ‘Geochemical and Stable Isotopic Evolution of the Guaraní Aquifer System in the State of São Paulo, Brazil’. *Hydrogeology Journal*, 10:643-655.



Jorge Néstor Santa Cruz

Doctor en ciencias naturales, orientación geológica, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.
Profesor titular, Facultad de Filosofía y Letras, UBA.
Coordinador técnico, Proyecto Acuífero Guaraní, OEA.
jorgenestorsantacruz@yahoo.com.ar

Volumen de la información procesada para la delimitación y caracterización del SAG

El número total de pozos hasta enero de 2009 ingresados en la Base de Datos Hidrogeológicos (BDH) es de 7459, quedando a cargo de los países su actualización e ingreso de nuevos valores.

Geológicamente se realizaron labores que consistieron principalmente en el mapeo de las cuatro áreas piloto, una por cada uno de los países intervinientes, levantamiento de 3800km de transectas geológicas, medición en perfiles estratigráficos, recolección de muestras para petrofísica, petrografía y estudios micropaleontológicos, medición de elementos para caracterizar paleocorrientes, tipos de dunas y fracturación en rocas volcánicas. Para determinar las paleocorrientes se realizaron mediciones sobre las caras de avalancha de las dunas eólicas de las unidades geológicas del SAG. Se establecieron 102 estaciones de medición, de las cuales 98 están ubicadas en la Formación Botucatu, distribuidas en las áreas piloto y en las transectas estudiadas.

Se ejecutaron un total de 855 determinaciones en laboratorio petrológico bajo igual número de preparados específicos para cada tipo de análisis. Se obtuvieron datos representativos a nivel regional de las unidades geológicas del SAG y otras más antiguas y modernas, de texturas, porcentajes de clastos, tipo de matriz y cemento, tipo de porosidad, diagénesis, presencia semicuantitativa de minerales granulares (livianos y pesados) y arcillas especialmente, búsqueda palinológicas-micropaleontológicas, así como también valores de porosidad y permeabilidad.

Las actividades de geofísica consistieron en levantamientos gravimétricos, geoelectrónicos y magnetotelúricos (MT y AMT). Los de gravimetría incluyeron 3366km de transectas y 1468 estaciones de medición en los cuatro países, los electromagnéticos (MT-AMT) y SEV se realizaron en 140 estaciones. Estos estudios se implementaron principalmente en la zona sur del SAG y las interpretaciones fueron confirmadas por el análisis de prospecciones sísmicas existentes.

Se analizaron las condiciones hidroquímicas e isotópicas sobre la base de los resultados de 346 muestras en laboratorio y 580 muestras con determinaciones físico-químicas y químicas in situ, además del análisis de los antecedentes disponibles. Asimismo se hicieron determinaciones de microalgas.

Se elaboró el Mapa Hidrogeológico del SAG. Este trabajo está compuesto por el Mapa Hidrogeológico del SAG, preparado a escala 1:3.000.000, y una serie de mapas a escala 1:6.000.000 que correspondieron a un mapa geológico simplificado y un mapa de pozos; mapa de isópacas que representan los espesores del acuífero; mapa de isópacas del techo del SAG, correspondiente a los espesores de las rocas que se encuentran por encima; mapa del SAG indicando en los afloramientos la condición de sector de recarga, descarga o de flujo paralelo ('no flujo'); mapa potenciométrico, indicativo de los diferentes niveles del flujo, y mapa de isotermas (líneas de igual temperatura). Además se generaron mapas secuenciales para conocer la dinámica en la ocupación y el uso del territorio, los que se realizaron sobre la base del análisis de imágenes satelitales.

Fueron realizados cuatro modelos numéricos hidrodinámicos (uno por área piloto) utilizando el programa Mod Flow y un modelo regional del SAG, utilizando el programa Transin.

Se diseñó una red de monitoreo regional del SAG en los cuatro países.

Para los estudios de precipitaciones anuales se utilizaron datos de 176 estaciones de la región, período de registro 1968-1997. Basado también en un conjunto de 42 estaciones con registros completos entre 1946 y 1997 se determinaron las variaciones seculares de la lluvia acumulada anual. El estudio de los regímenes de temperatura se realizó sobre la base de los datos de 181 estaciones de la región con períodos de treinta años completos calculándose la temperatura media mensual para cada una de ellas. Además, dentro de este número se consideraron aquellas con registros completos de cuarenta años para el estudio de las variaciones seculares.

Se generaron escenarios climáticos para la década 2081-2090, mediante experimentos numéricos, utilizando el modelo climático regional MCR-CIMA con una resolución media de 50km. 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.

