

Avance en el conocimiento hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en el sector sur

Leticia Rodríguez¹, Pablo Gamazo², Andrés Mira³, Juan Nittmann^{1,4}, Julián Ramos², Luis Vives³, Jorge Santa Cruz⁵, Jorge de los Santos⁶ y Gerardo Veroslavsky⁷

¹ Universidad Nacional del Litoral, Centro de Estudios Hidroambientales. Ciudad Universitaria CC 217 Ruta Nacional 168 Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina.

² Universidad de la República, Regional Norte, Departamento del Agua, Uruguay.

³ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Usunoff", UNCPBA-CIC. Azul, Argentina.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina.

⁵ Subsecretaría de Recursos Hídricos. Esmeralda 255, C1035ABE, CABA, Argentina.

⁶ Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFIA, Uruguay.

⁷ Universidad de la República Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas. Uruguay.

Mail de contacto: Leticia@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN

El carácter regional del Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG) no permitió analizar en detalle sectores subregionales como el área sur del sistema. Los estudios de detalle en el sur se circunscribieron a las áreas piloto de Concordia/Salto en la frontera argentino-uruguaya y Rivera/Santana en la frontera brasileño-uruguaya.

En este trabajo se presentan los resultados del primer proyecto de investigación del Plan Nacional Federal de Aguas Subterráneas financiado por el Consejo Hídrico Federal (COHIFE) a través de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, que tiene el objetivo de avanzar en el conocimiento hidrogeológico en el sector sur del SAG. Por un lado, el trabajo presenta una recopilación de todos los avances logrados luego de la finalización del PSAG y, por el otro, plantea un modelo geológico e hidroquímico del área de estudio. Se verificó el modelo hidrogeoquímico válido para el SAG y se identificó una potencial zona de descarga regional.

Palabras clave: Sistema Acuífero Guaraní, Dominio sur, Geología, Hidroquímica e Hidrogeología

ABSTRACT

Because of the regional character of the Project for the Environmental Protection and Sustainable Development of the Guaraní Aquifer System (PSAG), it was not possible to analyze sub-regional features of the system such as the Southern sector, in detail. Local studies in the south were limited to the pilot areas of Concordia/Salto in the border between Argentina and Uruguay, and Rivera/Santana in the border between Brasil and Uruguay.

This work presents the results of the first research project of the Plan Nacional Federal de Aguas Subterráneas financed by the Consejo Hídrico Federal (COHIFE) through Subsecretaría de Recursos Hídricos of Argentina, which has the objective the advancement of the hydrogeologic knowledge in the southern sector of the Guaraní Aquifer System-GAS. On the one hand, a compilation of all advances accomplished after completion of PSAG is presented and, on the other hand, a geological and a hidrogeochemical model of the study area are proposed. The regional GAS hidrogeochemical model was verified and a potential regional discharge area was identified.

Keywords: Guaraní Aquifer System, Southern domain, Geology, Hydrochemistry and Hydrogeology.

Introducción

Por su carácter regional, el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní (PSAG, 2004-2009) abarcó todo el sistema y sólo cuatro sectores

locales llamados pilotos, pero no analizó en detalle sectores subregionales como ser la zona sur del sistema. En él se trabajó en detalle en las áreas piloto Salto/Concordia en la frontera argentino-uruguaya y Rivera/Santana en la frontera brasileño-uruguaya. En ellas se

desarrollaron estudios de campo y modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos de escala local, sin que se profundizara el análisis a escala subregional del sistema acuífero. Tanto en el modelo hidrogeológico regional como en los locales, aún persisten incertidumbres por ejemplo respecto a la localización, extensión y papel de las estructuras en el movimiento del flujo de agua subterránea, el comportamiento del acuífero en condiciones transitorias, las zonas de descarga en el sector sur, entre otros interrogantes.

En consecuencia, se planteó un estudio cuyo objetivo es avanzar en el conocimiento hidrogeológico del SAG en el sector sur integrando información antecedente con información generada con posterioridad al PSAG, proponiendo una actualización del modelo hidrogeológico conceptual. Asimismo, el estudio serviría para identificar vacíos de información que sería necesario cubrir para reducir las incertidumbres del modelo conceptual.

El área de estudio comprende el llamado dominio sur del SAG (Gatsmans et al., 2012), incluyendo desde la zona aflorante del SAG en Uruguay y Paraguay, el SO de Brasil y las provincias de Misiones, Entre Ríos y Corrientes en Argentina, con énfasis en estas dos últimas y el sector uruguayo (Figura 1).

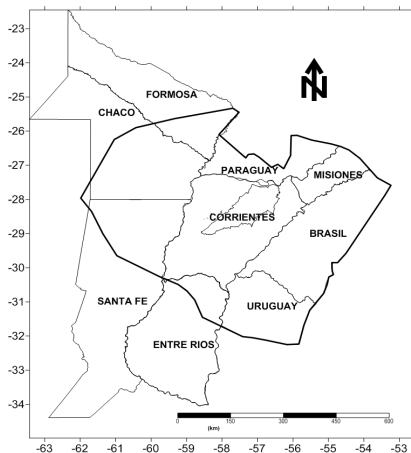


Figura 1. Área de estudio.

El proyecto, que recibe el apoyo del Consejo Hídrico Federal, se encuadra en una de las acciones de corto plazo previstas en el Plan Federal de Aguas Subterráneas de la República Argentina, es la continuación de estudios en el SAG y permite la participación en diversas acciones sobre acuíferos transfronterizos.

A partir de la nueva información recopilada y generada, en este trabajo se presenta una descripción de los principales rasgos geológicos del área, se plantean las facies hidroquímicas identificadas y se analiza la piezometría del SAG en el sector sur trazando una posible relación con los acuíferos superficiales en busca de potenciales zonas de conexión hidráulica entre las diferentes formaciones que componen la columna estratigráfica.

Materiales y métodos

Además de contar con la información recopilada, procesada y analizada en el PSAG, se realizó una exhaustiva búsqueda de nueva información. Desde la finalización del PSAG se han ejecutado unas pocas perforaciones en el sector sur que ayudan a mejorar la definición de la columna estratigráfica. En Argentina, se tienen las perforaciones de Monte Caseros y Curuzú Cuatiá (Corrientes), de las que se dispuso la columna estratigráfica y el perfilaje a través de los basaltos en la perforación de Curuzú Cuatiá (Geól. Angeleri, comunicación personal). Fuera del límite del SAG finalizó recientemente la perforación Villa Elisa 2 en Entre Ríos (Geól. Mársico, comunicación personal). Mársico (2013) reporta nuevos SEV's en Entre Ríos ubicados en las localidades de Federal y Ubajay, entre otras. En Uruguay, entre la zona aflorante de Rivera y Salto, se ejecutaron cuatro perforaciones: Pepe Núñez, Quintana 1, 2 y 3. Además, la Administración Nacional de Combustibles, Alcoholes y Portland, ANCAP, de Uruguay, puso a disposición la estratigrafía de los pozos arriba mencionados, el perfilaje y la estratigrafía del pozo Belén, y los perfilajes de las perforaciones Gaspar, Salto y Yacaré. En oficinas de ANCAP se realizó una revisión de varias secciones sísmicas que fueron interpretadas in situ con ayuda del software Kingdom. Asimismo, se obtuvieron valores de resistividad eléctrica (de ensayos AMT-MT) para cada litología presente en la zona de estudio deducidos de perfilajes de sondeos y parametrizados para los ensayos AMT realizados por Corbo et al. (2012). El Departamento del Agua, Regional Norte, Universidad de la República realizó sondeos en las perforaciones Belén y Daymán.

En relación a análisis de muestras de aguas recientes en Uruguay, Obras Sanitarias del Estado (OSE), la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA), y la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) realizaron un muestreo de pozos de OSE en los que se analizaron: pH, C.E., Dureza, Alcalinidad, Cl, NO₃, NO₂, NH₄,

SO₄, F, Fe, Mn, Zn, Na, Pb, As, Cd, C, Se, Cu. En Argentina, en 2012, en el marco del Plan Nacional Federal de Aguas Subterráneas-COHIFE-Subsecretaría de Recursos Hídricos, el Centro de Tecnología de Usos del Agua-CETUA muestreó perforaciones profundas en Entre Ríos y en Misiones, en las que se determinaron δ²H, δ¹⁸O (efectuados por el INGEIS) y se realizaron análisis químicos completos. En Concordia 1, 2 y 3, Elisa 1, Federación, Chajarí, Oberá y Posadas se midieron parámetros físico-químicos in situ. El informe del CETUA incluye análisis químicos completos en Concordia 1, 2 y 3, Villa Elisa, Federación y Chajarí.

Por otro lado, Vives et al. (2010) y Manzano et al. (2011, 2012) realizaron un exhaustivo estudio hidroquímico/isotópico abarcando el sector centro-sur de la provincia de Misiones, la provincia de Corrientes y parte del norte de Entre Ríos, muestreando y analizando aguas superficiales en lagunas y arroyos del Sistema Iberá, los ríos Arapey, Miriñay y Uruguay, y aguas subterráneas en perforaciones de diferente profundidad, además de realizar medidas in situ de ²²²Rn tanto en aguas superficiales como subterráneas.

Con respecto a niveles piezométricos y nuevas determinaciones de parámetros hidrogeológicos, prácticamente no se ha generado nueva información desde la finalización del PSAG. Se desconoce si OSE realizó monitoreos recientes en sus perforaciones.

Toda la información antecedente y recopilada para este estudio fue integrada en la definición de un modelo geológico, un modelo hidrogeoquímico y un modelo hidrogeológico que se apoya en los dos primeros.

Resultados

Modelo geológico

Desde el punto de vista geológico el SAG se encuentra ubicado en las cuencas Chacoparanense y Paraná, que han sido rellenadas con hasta 7000 m de espesor de rocas ígneas y sedimentarias que abarcan todo el registro fanerozoico, con importantes variaciones tanto verticales como laterales en las facies sedimentarias. Este hecho ha producido muchas veces una duplicidad de nomenclatura en las distintas formaciones o una diferente delimitación de las mismas. Esta configuración geológica se complica con la componente tectónica que, a lo largo de la historia geológica, ha condicionado la estructuración y desarrollo de los sedimentos en

las cuencas. En el PSAG se acordó una tabla cronoestratigráfica, que fue recientemente revisada por Mira (2012). El SAG estaría constituido por rocas sedimentarias arenosas de estas cuencas, situadas entre una discordancia regional Permo-triásica, y los basaltos confinantes del Grupo Serra Geral. Incluiría las formaciones Tacuarembó, Misiones, Guará y Botucatu del Jurásico y Cretácico inferior, y Caturrita, Pirambóia y Santa María del Triásico. Descansan sobre formaciones continentales detríticas como Fm. Buena Vista y Rio do Rastro, entre otras.

Para comprender la estructuración geológica del área de estudio se trazaron cuatro perfiles o cortes geológicos, de carácter regional, basados en la información geológica descrita, además de información de sondeos magnetotelúricos tipo MT y AMT (Oleaga, 2002; Corbo et al., 2012; Santa Ana et al., 2008) y el modelo geológico-gravimétrico (Mira, 2012). La Figura 2 muestra la ubicación de los perfiles trazados sobre el mapa geológico de la región. Los perfiles respectivos, uno longitudinal N-S y tres transversales, se aprecian en la Figura 3.

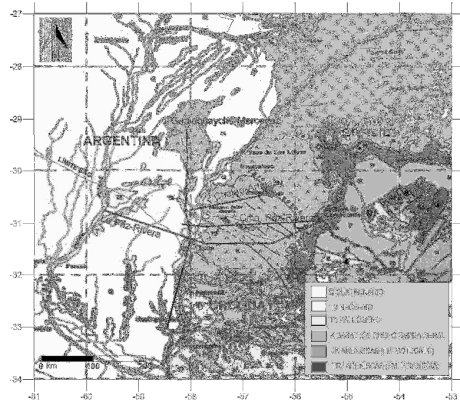


Figura 2. Mapa geológico (modificado de Schobbenhaus y Bellizzia, 2001). Ubicación de la traza de los perfiles geológicos.

En el perfil longitudinal se identifica la disminución de la profundidad al basamento entre las perforaciones de Gualeguaychú y Colón/San José, y una profundización significativa del basamento en torno a Concordia, estimada a partir del modelo gravimétrico. En torno a Chajarí el modelo gravimétrico indicaría una profundidad al basamento de aproximadamente 2200 m y

habría un espesor de sedimentos SAG algo mayor al estimado por Mársico (2013), de unos 450 m, siendo más potentes los sedimentos paleozoicos. En Monte Caseros puede interpretarse un espesor de SAG de 243 m. Cabría esperar un valor similar en Curuzú Cuatiá, que debe verificarse con datos adicionales. Entre La Paz y Concordia 1 se interpreta un aumento del espesor de basaltos en concordancia con una profundización del basamento, rasgo que también es interpretado por Mársico (2013) en su perfil La Paz- Chajarí.

Se construyeron una serie de mapas que apoyan los perfiles geológicos anteriores y

ayudan a comprender la estructuración geológica de la zona de estudio. Para su elaboración se dispuso de los perfiles litológicos de las principales perforaciones profundas. También se integraron las estimaciones de profundidad al basamento resultantes del modelo geológico-gravimétrico de la provincia de Corrientes propuesto por Mira (2012). Hay que tener en cuenta que dicho modelo no discrimina entre los distintos sedimentos prebasálticos, de ahí que el mapa de espesor del SAG solo se circunscriba a Uruguay y su límite con Entre Ríos.

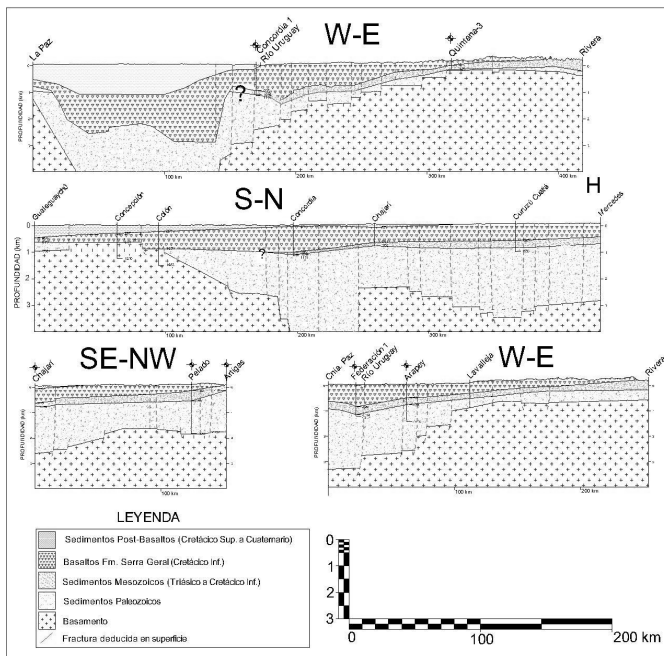


Figura 3. Perfiles geológicos regionales.

Se elaboró un mapa de profundidad al Basamento (Figura 4), otro de profundidad al piso de los basaltos (Figura 5) y un mapa preliminar de las formaciones constituyentes del SAG. Las menores profundidades al basamento se encuentran en Uruguay; dentro de la Cuenca Norte existen dos zonas hacia el este donde aflora el basamento cristalino compuesto por rocas Precámbricas. Luego se profundiza notoriamente en dirección NW encontrando su máxima profundidad estimada de unos 5000 m en el entorno del límite sur del SAG en el norte de Entre Ríos, mostrando un pronunciado escaque por debajo del río Uruguay. Esta

importante discontinuidad estructural ya había sido identificada por Corbo et al. (2012). En la Figura 4 se destaca una franja de profundidades menores a 2000 m que atraviesa diagonalmente la provincia de Corrientes de SE a NW, que conformaría un alto estructural dibujando la traza de la Dorsal de Asunción-Río Grande corroborando una existencia que ya fue sugerida por Rossello et al. (2006), aunque se encontraría desplazado hacia el oeste unos 200 km de lo sugerido por esos autores.

Notoriamente la profundidad al piso de los basaltos (Figura 5) es mínima a lo largo de la transición entre la zona de afloramiento en

Uruguay y el inicio de las coladas basálticas, y también en un sector del noreste de la provincia de Corrientes profundizándose hacia el oeste, aunque con gradientes suaves. En cambio en Entre Ríos, acompañando la discontinuidad estructural del basamento, la base de los basaltos muestra importantes gradientes.

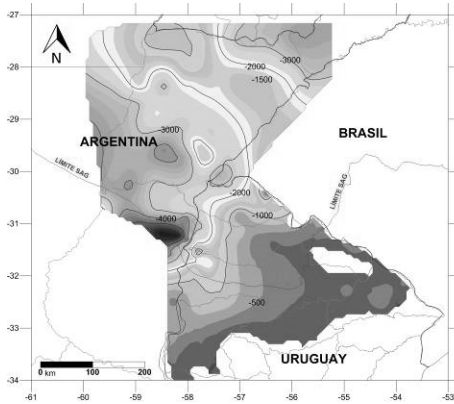


Figura 4. Profundidad al basamento.

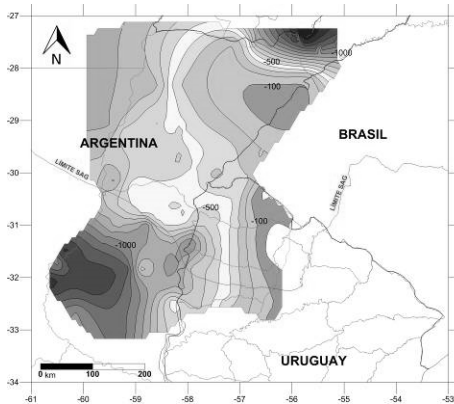


Figura 5. Profundidad al piso de los basaltos.

Modelo hidrogeológico

La metodología de análisis fue la planteada por Manzano y Guimaraens (2009) en el estudio hidrogeológico realizado en el PSAG.

Los análisis químicos obtenidos se agruparon en tres grupos de acuerdo a su ubicación geográfica y a su posición en la red de flujo. La identificación de facies que se realiza se basa en las definidas por Manzano y Guimaraens (2009) para todo el SAG.

Zona 1: Rivera-Santana/Tacuarembó (zona de recarga regional y corto tiempo de tránsito en el acuífero).

Facies A (Rivera Tacuarembó): aguas entre Ca-HCO₃ y Mg-HCO₃ (siendo mayores los contenidos de Ca en la formación de Tacuarembó), muy poco mineralizadas (CE <250 mS/cm), con valores de pH entre 4 y 8, valores de la relación Cl/SO₄ >> 1.

Zona 2: Litoral Río Uruguay (zona de confinamiento y de largo tiempo de tránsito en el acuífero).

Facies B (Litoral Río Uruguay): aguas de tipo Na-HCO₃, con mineralización entre baja y media (CE = 500 a 2000 mS/cm), valores de pH entre 7 y 10, valores de la relación Na/Cl >> 1, valores de la relación Cl/SO₄ cercanos a 1 (aunque a veces Cl>SO₄ y otras Cl<SO₄).

Facies C (Litoral Río Uruguay Salobre): aguas de tipo Na-Cl Na-SO₄ Tienen mineralización alta (CE = >6000 mS/cm), valores de pH entre 7 y 9, valores de la relación Na/Cl ≈ 1, valores de la relación Cl/SO₄ cercanos a 1.

Zona 3: Artigas-Cuarai (zona de recarga local, y tiempo de tránsito medio)

Facies A' (Artigas Cuarai) aguas entre Ca-HCO₃, poco mineralizadas (CE <700 mS/cm), con valores de pH entre 5 y 7.5, valores de la relación Cl/SO₄ > 1 (aunque a veces Cl<SO₄)

El modelo conceptual hidrogeológico propuesto para el SAG por Manzano y Guimaraens (2009) es también adecuado para explicar la evolución hidrogeológica del área de estudio. La modelación hidrogeológica realizada por estos autores apoya la hipótesis que las aguas de la Facies A son principalmente, el resultado de la recarga de agua meteorica (más excedentes de riego), que disuelve CO₂ y carbonatos de Ca y Mg. Estos autores proponen una evolución de las aguas de la Facies A, hacia aguas de la Facies B considerando procesos de mineralización leve e intercambio de Mg y Ca por Na. Proponen que la Facies C es el producto de la mezcla de aguas de la Facies B con otras aguas más salinas y de procedencia profunda.

En la zona de estudio se observa una clara tendencia a la pérdida de Mg conforme aumenta el tiempo de tránsito en el acuífero. Por razones de espacio, sólo se presenta el diagrama de Piper correspondiente a la Facies B (Figura 6).

Para estudiar la viabilidad del modelo conceptual se realizó la modelación mediante el programa Phreeqc considerando aguas con una composición promedio para cada Facies,

incluyendo los minerales Halita, Calcita, Dolomita e intercambio catiónico para Na, Mg y Ca. La modelación se realizó admitiendo una incertidumbre de hasta 30 % en las concentraciones y por lo tanto los resultados deben considerarse a nivel cualitativo y a los únicos efectos de evaluar la viabilidad del modelo conceptual. El programa presentó cuatro posibles combinaciones de procesos. En todos ellos se observó un aumento de Na por intercambio catiónico y disolución de Halita, consumo de Mg por intercambio o precipitación de Dolomita y consumo de Ca por intercambio o precipitación de Calcita.

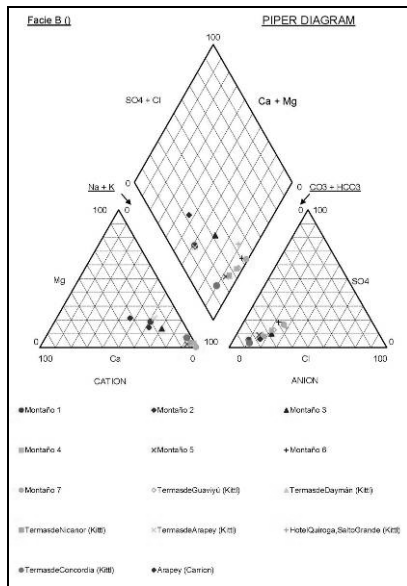


Figura 6. Identificación de Facies B (Litoral Río Uruguay).

Modelo hidrogeológico

Desde la finalización del PSAG no se realizaron nuevas mediciones de niveles piezométricos que permitan actualizar el mapa trazado por Gastmans et al. (2012), pero sí pueden hacerse reinterpretaciones del comportamiento hidrogeológico subregional con el apoyo de los modelos geológico e hidrogeológico aquí presentados. Se elaboró un mapa piezométrico del sector sur del SAG (Figura 7). Debido a la falta de datos de niveles hacia el oeste, las curvas piezométricas interpoladas en ese sector no deberían considerarse. Nótese que en la figura se han incluido los lineamientos superficiales

identificados en la provincia de Corrientes, que están siendo evaluados en otros proyectos en ejecución junto con los análisis hidroquímicos e isotópicos, con el fin de explicar los patrones hidroquímicos detectados en aguas de perforaciones con profundidades mucho menores a las del SAG en el sector oriental de la Provincia de Corrientes, entre los esteros del Iberá y el río Uruguay.

A nivel subregional, dentro del área comprendida en el rectángulo indicado en la Figura 7, se confirmarían las direcciones de flujos divergentes desde la zona de afloramiento y recarga en Rivera (UY)/Santana (BR) hacia el sector centro-oriental de la provincia de Corrientes, con direcciones NE-SW, y E-W hacia el norte de la provincia de Entre Ríos. Se sugiere un posible flujo saliente a través del límite sur del SAG. Esta posibilidad deberá ser validada en el futuro mediante información de campo adicional y/o simulaciones numéricas.

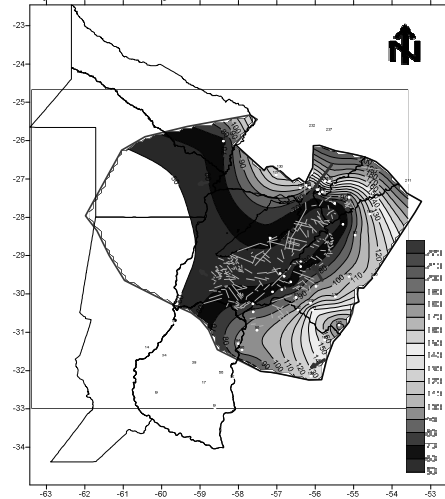


Figura 7. Mapa potenciométrico del SAG en el sector sur superpuesto con los lineamientos (Mira, 2012). Niveles en msnm.

Un sistema de flujo similar fue planteado por Oleaga (2002) para el sector uruguayo aunque con menor detalle. Los niveles máximos son del orden de 190 msnm en zonas no afectadas por los campos de bombeo en Rivera/Santana, descendiendo a cerca de 90 m en cercanías del río Uruguay. El gradiente hidráulico disminuye en el sentido de flujo hacia el oeste. Cercano a la zona de afloramiento es del orden de $5,5 \times 10^{-4}$, en el centro de Uruguay es del orden $4,20$

$\times 10^{-4}$ y en las inmediaciones del río Uruguay descendiendo a alrededor de $1,5 \times 10^{-4}$.

El gradiente es muy pronunciado en el NE, identificándose un flujo en dirección NE-SW en coincidencia con la dirección regional de escurrimiento subterráneo del SAG. Se identifica ingreso de flujo desde la zona aflorante ubicada en el sur de Paraguay, identificada como tal en los estudios del SAG-PY (2007), donde los gradientes hidráulicos son similares a los de la zona aflorante en UY.

En el centro de la provincia de Corrientes habría una zona de muy bajo gradiente y flujo convergente, aunque la piezometría es muy escasa en todo el sector occidental de la provincia. En la figura se han superpuesto los lineamientos mapeados en superficie, cuya relación con la hidrogeología y la hidroquímica son aún motivo de estudio.

Las zonas aflorantes en Uruguay y Paraguay constituyen zonas de recarga del dominio sur del SAG. En el PSAG se había marcado una zona potencial de recarga directa en el centro de Corrientes en coincidencia con la meseta de Mercedes. A la luz de los avances del conocimiento geológico en la zona (Mira, 2012; Mira et al., este volumen), este área quedaría descartada como de recarga directa por tratarse posiblemente de un afloramiento del miembro Solarí (intertrap entre basaltos Serra Geral) y no de areniscas del SAG.

Tramos de los ríos Uruguay y Paraná, las formaciones infrayacentes, zonas de fracturamiento de los basaltos, entre otros, podrían constituir posibles zonas de descarga (o recarga). A los fines de explorar esta posibilidad, se construyó un mapa piezométrico preliminar de las formaciones acuíferas suprayacentes a los basaltos en territorio argentino, sin detenerse en su origen sedimentológico y al sólo efecto de su posterior comparación con la piezometría del SAG (Figura 8). Los valores de niveles corresponden a una ventana temporal de aproximadamente los últimos 12 años. Para definir el nivel de base del acuífero superficial, la piezometría se complementó con información de escalas hidrométricas ubicadas en la red de drenaje principal y secundaria, tanto en ríos como en lagunas, cuya ubicación se muestra en la Figura 8. En la Mesopotamia Argentina se identifica claramente la divisoria de aguas subterráneas que separan el flujo subterráneo hacia el río Paraná y el río Uruguay, los que constituyen las vías de descarga del acuífero superficial. Los gradientes bajos acompañan la topografía.

La Figura 9 muestra el resultado, a nivel preliminar, de sustraer al mapa piezométrico del

SAG el mapa piezométrico superficial. Valores positivos indicarían la potencialidad de flujos ascendentes.

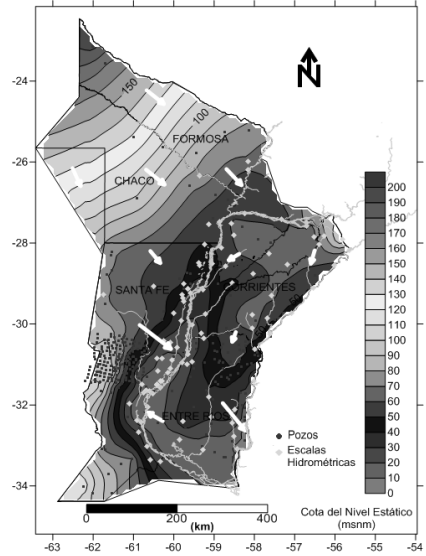


Figura 8. Piezometría superficial

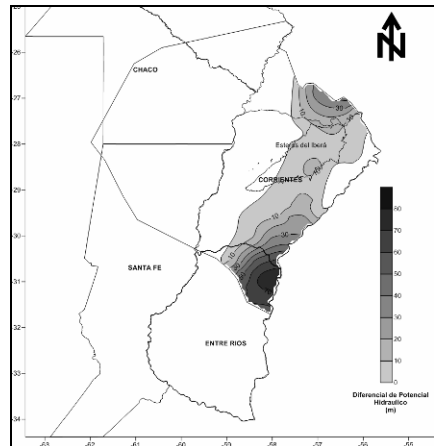


Figura 9. Diferencia entre la piezometría del SAG con la del acuífero superficial.

El sector oeste se ha eliminado de la figura teniendo presente la falta de datos del SAG. A lo largo del río Uruguay existiría una franja de aproximadamente 70-80 km en la cual se presentarían gradientes positivos.

Si se analizan en conjunto los mapas presentados se observa la presencia de una zona de escasos 100 m de profundidad al techo

del SAG en el centro-este de Corrientes, cercana al río Uruguay, donde también habría gradientes hidráulicos positivos. Asimismo, la zona se caracteriza por numerosos lineamientos superficiales, cuya continuidad en profundidad no es conocida aunque es probable que afecte a toda la serie sedimentaria (Mira, 2012). De existir fracturamiento de los basaltos confinantes, podría producirse la conexión hidráulica entre los sedimentos infrabasálticos y las capas superiores.

Conclusiones

En este trabajo se han presentado los avances del conocimiento hidrogeológico en el dominio sur del SAG, destacándose las principales conclusiones:

- Se detectó un sector del noreste de la provincia de Corrientes con escasa profundidad al piso de los basaltos.
- Se verificó la importante discontinuidad estructural en el límite Uruguay/Argentina en torno al área piloto Salto-Concordia
- Se verificó en el sector de estudio la validez del modelo conceptual hidrogeoquímico propuesto para el SAG por Manzano y Guimaraens (2009) que explica la evolución hidrogeoquímica del área de estudio.
- Se identifica una zona de potencial descarga regional del SAG en el centro-este de Corrientes, entre los esteros del Iberá y el río Uruguay.

Agradecimientos

Se agradece el aporte de información a los Geólogos Daniel Mársico y José Luis Ageleri, y ANCAP, OSE, DINAMA y DINAGUA (Uruguay).

Referencias

Corbo, F., Arzate, J., and Oleaga, A., 2012. Structure of the Guarani Aquifer in the surroundings of the Uruguay River from magnetotelluric soundings *Geofísica Internacional*, 51(1):17-37.

Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang Chang, H., Caetano-Chang, M. R., y Nogueira Pressinotti, M. M. 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión, *Boletín Geológico y Minero*, 123, 249–265.

Manzano, M. y Guimaraens, M. 2009. Hidroquímica regional del SAG. Estudio del origen de la composición química de las aguas subterráneas del Sistema Acuífero Guaraní. Proyecto para la Protección

Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero.

Manzano, M., Rodríguez, L., Ortega, L., Vives, L., Heredia, J., Mira, A., Nittmann, J. y Valladares, A., 2012. Evaluación hidroquímica e isotópica de la hidrogeología en torno a los Esteros del Iberá, Corrientes, Argentina. *II Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie*. 23-27 abril., Bahía Blanca, Argentina.

Manzano, M., Rodríguez, L., Heredia, J., Vives, L., Nittman, J., Zabala, M.E., Valladares, A., Agarwaal, P. and Araguás, L., 2011. Hydrochemical and isotopic assessment of the Iberá hydrogeological system in NE Argentina. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-6898, EGU General Assembly 2011.

Mársico, D., 2013. Aportes a la perspectiva geológica e Hidrogeológica regional en el sector centro Este de la cuenca chacopampeana. Tesis doctoral. Universidad de la Coruña, España.

Mira, A., 2012. Modelo conceptual hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní con énfasis en el sector Argentino”, Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cartagena, España.

Oleaga, A.B., 2002. Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral. Disertación Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 119 p.

Rossello, E.; Veroslavsky, G.; Santa Ana, H.; Fúlfaro, V.J.; Fernández Garrasino, C. 2006. La dorsal Asunción-Río Grande: un altofondo regional entre las cuencas Paraná (Brasil, Paraguay, Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). *Revista Brasileira de Geociencias*, 36, 181-196

SAG-PY, 2007. Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay. Informe Técnico de Cooperación entre la Secretaría del Ambiente y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR).

Schobbenhaus, C. y Bellizzia, A., 2001. Mapa geológico de América del Sur, 1:5.000.000. CGMW - CPRM - DNPB UNESCO, Brasilia.

Vives, L., Rodríguez, L., Aggarwall, P., Araguas, L., Manzano, M. and Valladares, A., 2010. Preliminary analyses of the role of wetlands and rivers in the groundwater discharge of the Guaraní Aquifer System in NE Argentina. *The International Symposium on Isotopes in Hydrology, Marine Ecosystems, and Climate Change Studies*. Monaco, 27 March through 1 April. 2011.

Investigaciones Hidrogeológicas Acuífero El Zapallal (Perú)

José Bolzicco¹, Juan García¹, Raul Ortiz¹, Alex Ludeña¹, Maritza Jurado¹, Guillermo Diaz¹, Fernando Estrada¹, Felipe Huerta¹,

¹ MWH Perú, Avda. Conquistadores 6538, San Isidro, Lima Perú

Mail de contacto: jose.bolzicco@us.mwhglobal.com

RESUMEN

En el NW del Perú, entre las localidades de Piura y Chiclayo (200Km), se desarrolla un desierto costero de 100km de ancho, de baja pluviosidad y elevada evapotranspiración (300 y 1500mm/año respectivamente). El gobierno peruano ha desarrollado en la zona proyectos de riego basado en el riego con agua de trasvase (embalses Andinos) y aguas subterráneas locales, debido al bajo costo de las tierras y clima local atemperado. Se desarrollaron estudios hidrogeológicos que permitieron identificar la presencia del acuífero confinado, El Zapallal, a más de 100m de profundidad y con potencias superiores a los 100m, abarcando una superficie de más de 10000 Km². Con aguas aceptables para el riego (CE < 1500µS/cm) y productividad media de 30-40 l/s. Destacan como objetivos de los estudios: diseño adecuado de captaciones; planificación sustentable de explotación del acuífero; y desarrollo de planes sociales que compatibilicen las actividades de los pobladores rurales y las explotaciones industriales.

Palabras clave: acuífero confinado – sostenibilidad – sobreexplotación – sociabilidad.

ABSTRACT

In the NW of Peru, between the towns of Piura and Chiclayo (200km), we found a coastal desert of 100km wide, low rainfall and high evapotranspiration (300 and 1500mm/year respectively). In this area, the Peruvian government has developed irrigation projects with diverted water, from Andean reservoirs, and local groundwater. The low cost of land and tempered local temperatures promote the projects. Hydrogeological studies were developed identifying the presence of a confined aquifer, named El Zapallal. It is located at more than 100m deep and has a thickness of more than 100m, covering an area of more than 10000 km². The groundwater has a good quality for irrigation (EC <1500µS/cm) and has an average productivity of 30-40 l/s. Highlights of the study are: adequate pumping well design, planning sustainable aquifer use and social development plans to support the simultaneous use of the aquifer for rural activities and industrial agriculture.

Keywords: confined aquifer – sustainability – overexploitation - sociability

Introducción

El desarrollo de proyectos agrícolas en el NW del Perú, con el objetivo de lograr un mayor desarrollo económico del país, en búsqueda de otras alternativas comerciales diferentes a la minería, han obligado al estudio de diferentes alternativas de provisión de agua que permitan satisfacer las demandas del riego.

Estas investigaciones son de primordial importancia ya que las provincias involucradas (Piura y Lambayeque, ver Fig. 1) se caracterizan por presentar condiciones de extrema aridez, con precipitaciones inferiores a los 300mm anuales y demandas de agua atmosférica superiores a los 1500 mm anuales, a lo que se suma la ausencia de recursos de agua superficial.

Los proyectos de irrigación optan, por una parte, en disponer de agua para irrigación a partir del trasvase de aguas desde la región Andina hacia la región costera (como por ejemplo el proyecto de trasvase del Embalse El Limón para el proyecto de irrigación de Olmos).

No siempre las obras de trasvases son suficientes para satisfacer los requerimientos de agua para riego, y se deben identificar nuevas fuentes de provisión como complemento.

Ello ha contribuido a la investigación de fuentes de agua subterráneas, algunas de ellas aún sin explotar, como es el caso del acuífero el Zapallal, del cual se espera caracterizar sus propiedades hidráulicas, físico químicas y su potencialidad y sostenibilidad de explotación en el tiempo.

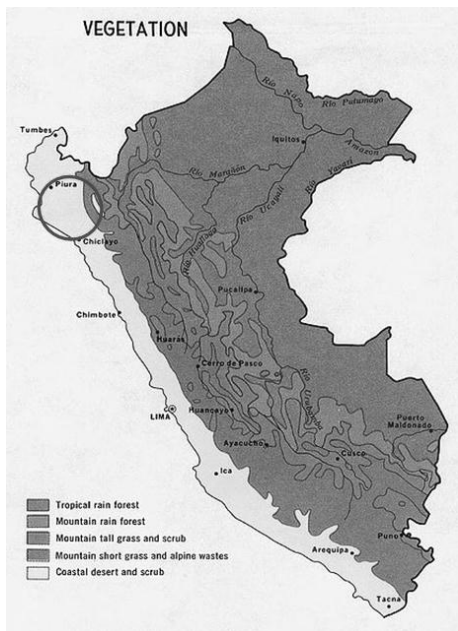


Figura 1. Ubicación de la Zona de Estudio Provincias de Piura y Lambayeque (Perú).

Los estudios se centraron en identificar los rasgos geológicos necesarios que permitieran delinear la geometría y posición del acuífero sometido a estudio. Ello con el apoyo de estudios geológicos regionales, prospección geofísica y perfiles litológicos de sondeos exploratorios.

Asimismo se ha buscado caracterizar sus propiedades hidráulicas, sus características físico químicas y su relación con otras unidades acuíferas suprayacentes así como sus posibles fuentes de recarga.

El objetivo final de los trabajos ha sido poder definir la potencialidad de este acuífero para satisfacer demandas de riego, consumo humano o industrial.

Clima

En la zona existen una serie de estaciones meteorológicas que permiten evaluar el comportamiento climático de la zona. Se produce una concentración de las lluvias entre el período de enero a mayo, en tanto que el resto del año las precipitaciones son muy escasas. Sus magnitudes varían entre 114 y 271 mm anuales (Fig. 2), aunque en año del Niño estos valores pueden ser ligeramente superiores.

La temperatura ambiente es el único elemento climático que favorece la instalación de proyectos de irrigación, se muestra muy estable y constante a lo largo del año, con valores medios diarios diurnos que oscilan entre 20 y 27°C, aunque se registren mínimas de 10°C y máximas de hasta 37°C.

La evapotranspiración potencial (Eto), se ha estimado por el método Penman-Monteith y calculadas finalmente con el CROPWAT 8.0 (recomendado por la FAO). Los valores oscilan entre 1400 y 1600 mm/año, con una demanda diaria promedio de entre 4.0 y 4.5 mm.

De esta forma la deficiencia hídrica atmosférica es más que relevante en la zona, lo cual tiene un gran impacto sobre las posibilidades de encontrar recursos hídricos superficiales.

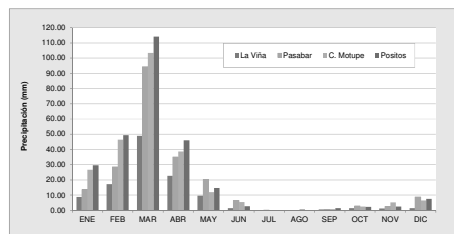


Figura 2. Precipitaciones medias mensuales (1968-1998). Provincia Lambayeque (Perú)

Hidrología

De Noreste a Sudoeste atraviesan la región bajo estudio los ríos Cascajal y Olmos (Fig. 3).



Figura 3. Cuencas Hidrográficas Provincias de Piura y Lambayeque (Perú)

El régimen hidrológico de estos ríos presenta características irregulares, de tipo torrencial, con descargas extremas y efímeras en épocas de lluvias y nulas el resto del año; se han observado caudales extraordinarios en años con fenómeno de El Niño.

La estación Pueblo registra los caudales del río Olmos (ECSA, 2011), con una descarga promedio anual de $0.9\text{m}^3/\text{s}$, mínima de $0.1\text{m}^3/\text{s}$ y máxima de $7.6\text{m}^3/\text{s}$. La estación Zapatero registra los caudales del río Cascajal (Nippon Koei, 2009), con un caudal medio de $2.4\text{m}^3/\text{s}$ y máximo de $16.4\text{m}^3/\text{s}$. (Fig. 4)

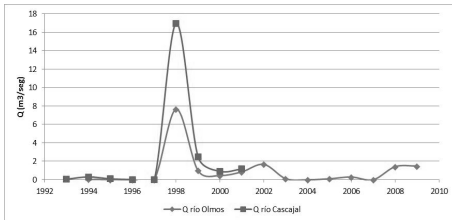


Figura 4 Caudales mensuales ríos Cascajal y Olmos. Provincia de Lambayeque (Perú)

Dada la característica intermitente y aluvional de estos ríos sus caudales (abastecidos únicamente por las escasas precipitaciones) no son aprovechables más que esporádicamente por los habitantes rurales de la región para sus necesidades de riego y eventualmente de agua potable. La mayor parte del volumen de agua que escurre por los cauces se evapora o se infiltra hacia el acuífero aluvial asociado.

Con dirección Norte- Sur, al Este de la zona de estudio, y con un régimen permanente alimentado por las altas precipitaciones de la región Andina, el río Huancabamba tiene su origen en la laguna Shimbe. Tiene una superficie de 3710Km^2 y una longitud de 151Km , las precipitaciones son variables con la altitud, registrándose valores anuales de 300mm a cota 1200msnm y de 1500mm a 3500msnm . El volumen de las aportaciones por lluvia es de 1500Hm^3 que corresponde a una precipitación anual de 400mm . Es de este río desde donde se captan las aguas para realizar el trasvase a la zona de estudio y alimentar a una de las futuras zonas bajo riego.

El caudal medio anual del río en la estación el Limón es de $26.1\text{m}^3/\text{s}$, con un máximo de $41.1\text{m}^3/\text{s}$ en el año 1971 y mínimo de $16.4\text{m}^3/\text{s}$ en el año 1979. (Fig. 5)

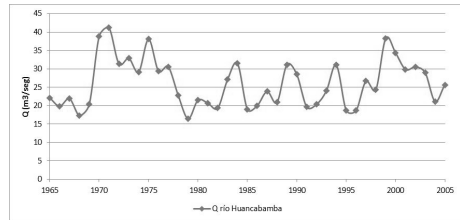


Figura 5 Caudal anual río Huancabamba. Provincias de Piura, Lambayeque y Cajamarca (Perú)

Geología

En el área de estudio se presentan afloramientos cuyas edades van desde el paleozoico hasta el cuaternario reciente. Los afloramientos están conformados por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, las que según su distribución permite identificar 3 regiones geológicas (Fig. 6):

Cordillera Occidental de los Andes, constituida por rocas sedimentarias, intrusivas, metamórficas y volcánicas, representadas por filitas, pizarras, esquistos, areniscas, cuarcitas, dacitas y tonalitas.

Macizo Costero, constituido por rocas magmáticas y metamórficas cuyas edades varían desde el paleozoico hasta el paleógeno.

Depresión Costanera, ubicada entre las dos unidades anteriores, se caracteriza por presentar un relieve suave y está caracterizada por poseer una estratificación compleja con intercalaciones de cantos rodados, gravas, arenas y arcilla.

Es dentro de esta depresión Costanera que se ubican las formaciones acuíferas que son de interés para diferentes usos, tales como los:

Depósitos Aluviales (Qpl-A), son depósitos Cuaternarios que se identifican en el cauce de los valles y quebradas, constituidos principalmente por bloques polimícticos envueltos en matriz limo arenosas poco compactas. Litológicamente están constituidos por gravas y arenas con clastos subangulosos a subredondeados y hasta redondeados en una matriz arenosa sin compactar. Estos configuran extensas zonas a manera de terrazas, por lo general son secos y solo en época de lluvias tienen la presencia de agua.

Formación Zapallal (Nmp-m), son depósitos del Mioceno, Terciario Superior, que subyacen a los materiales Cuaternarios. Litológicamente presenta tres miembros: superior, medio e inferior. El primero es una secuencia de conglomerados, lutitas y areniscas; el miembro medio constituido por areniscas cuarzosas

interestratificadas con lutitas, arcillas y areniscas calcáreas, mientras que el miembro inferior conformado por horizontes arcillosos, areniscas calcáreas y conglomerádicas. Desde el punto de vista hidrogeológico esta formación, y en especial su miembro superior, son de suma importancia debido a que constituye el reservorio acuífero de la región de Piura.

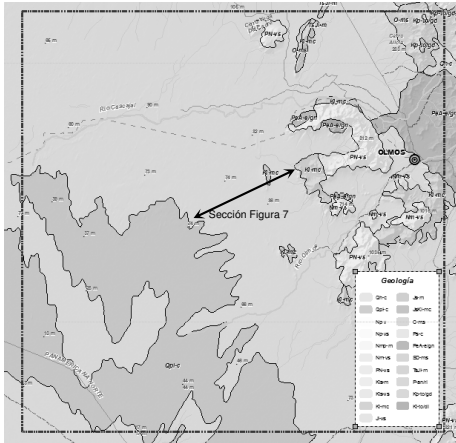


Figura 6. Geología Regional Zona de Estudio (Fuente INGEMMET) (Perú)

Hidrogeología

Los estudios hidrogeológicos se han apoyado sustancialmente en la información geológica regional y local (en base a registros litológicos de muy pocos piezómetros), así como en base a estudios geofísicos. En la Fig.7 se ha conceptualizado una sección esquemática transversal, orientada de Noreste a Suroeste, de los acuíferos de la zona de estudio, y cuya ubicación se ve en la Fig.6.

Acuífero Libre: La descripción hidrogeológica nos indica que desde superficie, y con un espesor de unos 30m, se encuentra un primer estrato de sedimentos aluviales (arenas, limos y arcillas), seguido de una capa de gravas con arenas gruesas cuyo espesor varía de 7 a 20m. Ambos niveles conformarían el acuífero superior (libre). Es el acuífero que es actualmente explotado en la región mediante pozos tubulares o excavados que no exceden los 60-70 m de profundidad. Su uso es en general para riego y en algunos casos para consumo humano. Es un acuífero de relativa buena productividad con caudales que varían entre 10 y 80 l/s. Los parámetros hidráulicos

definidos en varios estudios le asignan una permeabilidad media de 50m/día y una transmisividad media de 2500m²/día. No obstante la relativa buena productividad del acuífero, las aguas son de mediocre a mala calidad para el riego y consumo humano ya que se presentan valores de conductividad eléctrica altos a muy altos (entre 1500 a más de 8000 µS/cm). Predominan las aguas de tipo C3-S2 (diagrama salinidad RAS), pero pueden llegar a ser hasta C6-S4. Son de tipo Bicarbonatada y/o Cloruras Sódicas. La recarga de este acuífero es muy limitada, las escasas precipitaciones de la región, los retornos de riego, los caudales esporádicos de los ríos Cascajal y Olmos en época del Niño y eventualmente el agua importada de consumo humano.

Acuitardo: Posteriormente, por debajo de esta capa, se presenta una capa impermeable de arcilla y limo, con un espesor medio de unos 50-70m (acuitardo). Este material se encarga de constituirse en el material que regionalmente confina al acuífero El Zapallal.

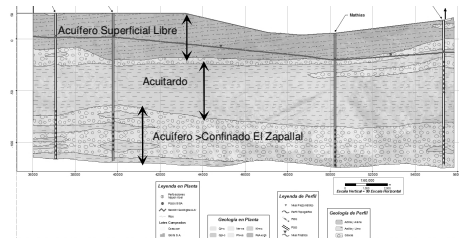


Figura 7. Conceptualización del modelo hidrogeológico acuífero El Zapallal (Fuente INGEMMET) (Perú)

Acuífero Confinado: Por debajo de este estrato impermeable y confinante se identifica un paquete de gravas con arenas de granulometría variada que se continúa hasta las profundidades máximas prospectadas (180m), dando lugar a espesores máximos de hasta 50-60m (pero que podrían ser mayores de acuerdo a la geología regional). Esta capa es el acuífero confinado El Zapallal.

Las características hidráulicas del acuífero el Zapallal se obtienen a partir de algunos ensayos de bombeo que asignan valores de Transmisividad de 400-500m²/día y valores de Permeabilidad de 1 a 2m/día. Los caudales de bombeo aforados son del orden de 40 l/seg y se han observado depresiones en el nivel piezométrico de 50m. El coeficiente de almacenamiento se ha estimado en 1*10⁻⁴. Las aguas del acuífero son del tipo Cloruradas y/o Bicarbonatadas Sódicas, del tipo C3-S2 (lo que

denota un cierto riesgo de sodificación del suelo en caso de usarse para riego) y con conductividades eléctricas inferiores a los 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que en general las hace aptas para el consumo humano y otros usos.

Desde un punto de vista de los volúmenes de agua almacenados en el acuífero, y basados en su geometría y parámetros hidráulicos del acuífero, se estima que el mismo alberga del orden de 10000 Hm^3 por cada 10m de espesor de acuífero y unos 30 a 60 Hm^3 actuando como acuífero confinado.

Desde este punto de vista la potencialidad volumétrica del acuífero es importante para una región que carece de recursos hídricos superficiales. No obstante ello la productividad del acuífero no es muy elevada (menos de 1 l/seg/m de depresión del acuífero) y para caudales de 40 l/seg la depresión del nivel piezométrico hace que el nivel dinámico obtenido durante las pruebas de bombeo se sitúe a no más de 15 m del techo confinante. Por lo que de desearse extraer mayores caudales de agua o aumentar la presión extractiva sobre el acuífero implicaría muy probablemente tenerlo que hacer a expensas de cambiar el régimen de funcionamiento del acuífero confinado a libre

Dos aspectos que aún deben dilucidarse de esta unidad acuífera son: 1) la base de ésta formación acuífera confinada, lo cual permitiría disponer de mayores espesores saturados para la explotación del mismo, ya que los estudios geofísicos regionales para investigación petrolera han identificado la posición de la roca madre a más de 400m de profundidad; y 2) la recarga de la unidad acuífera, ya que debido a su extensión regional, a que no es explotado y por tal la falta de pozos exploratorios no hay posibilidad de augurar el origen de la misma y por tal el grado de reposición que podría tener como para asegurar explotaciones sostenibles en el tiempo.

Otras Consideraciones

Si bien el acuífero el Zapallal tiene un gran potencial en convertirse en una fuente de provisión de agua en la región (por su calidad y los volúmenes almacenados), se deberá definir con mayor exactitud sus real productividad y la sostenibilidad en el tiempo de estas acciones mediante investigaciones más exhaustivas.

Existen algunos peligros adicionales en usufructuar este recurso, más allá de los posibles problemas de sobreexplotación del mismo. Los problemas se centran en cuatro aspectos fundamentales: 1) la calidad deficiente

en la construcción y diseño de los pozos de explotación, habiéndose identificado sitios en los que se ha puesto en comunicación el acuífero superficial (de mayor salinidad) con el profundo de buena calidad, generando posibles puntos de contaminación cruzada; 2) la elección de los cultivos a instaurar en las parcelas de riego, lo cual queda normalmente a elección del adquirente de los terrenos, que busca recuperar rápidamente las inversiones, plantando por ejemplo caña de azúcar para producir biocombustibles, sin reparar en los grandes volúmenes de agua de riego necesarios para su crecimiento; 3) la falta de diseño de sistemas de drenaje para las obras de riego en la suposición de que los niveles superiores del suelo están bien drenados, aunque la experiencia indica que rápidamente comienzan a surgir problemas de revenimiento de sales y encharcamientos dada las características salinas de los suelos superficiales, y finalmente 3) las relaciones entre comunidades e industrias agrícolas, ya que las primeras piensan que ven afectados sus derechos al uso de un recurso al que no tienen acceso por el elevado costo de las perforaciones profundas, y en tal sentido no reciben el apoyo del gobierno para poder satisfacer sus necesidades.

Conclusiones

No existen recursos hídricos superficiales suficientes como para satisfacer las demandas de agua local para riego y consumo, por lo que se recurre al trasvase desde cuencas Andinas y se complementa con aguas subterráneas.

El acuífero superficial si bien tiene un elevado potencial productivo, la mediocre a mala calidad de sus aguas hace que su uso sea bastante restringido al riego de cultivos resistentes a la salinidad

Se ha confirmado la presencia del acuífero Zapallal, constituido por materiales gravosos y arenosos con intercalaciones de sedimentos marinos (conchillas y material calcáreo) cuyo espesor cuantificado es de unos 100m, pero cuya potencia real podría ser al menos el doble dado los rasgos de la geología regional. Y sería el potencial acuífero a ser utilizado como complemento de las necesidades de riego.

Es un acuífero confinado, que no está en explotación, con valores de Transmisividad (T) de 400/500 $\text{m}^2/\text{día}$, permeabilidad (K) de 4/5 m/d, espesor saturado (e) de 100 m y coeficiente de almacenamiento (S) de $1 \cdot 10^{-04}$. Se estima una porosidad eficaz del 10%.

La calidad del agua es relativamente buena, con valores de CE inferiores a los 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, del tipo Cloruradas y/o Bicarbonatadas Sódicas, clasificadas como C3S2, riego con precaución.

La recarga del acuífero Zapallal probablemente sea proveniente del río Piura, a mas de 100Km de distancia de la zona de estudio, donde se aprecia el afloramiento en superficie de la formación Zapallal, pero no existen suficiente información como para corroborar este aspecto.

Se identificaron deficiencias constructivas en las perforaciones exploratorias del acuífero profundo que permitirían la conexión de las aguas de mala calidad del acuífero superior con las de buena calidad del acuífero Zapallal.

El volumen de agua almacenada a presión en el acuífero confinado en toda el área que supuestamente abarca es de entre 30 y 60Hm³.

El volumen de agua gravífica almacenada en el acuífero profundo para un espesor de explotación de 10m, y que involucre toda el área del mismo, es del orden 10000Hm³.

No existe regulación en los tipos de cultivos a instaurar en las parcelas de riego y no se han diseñado sistemas de drenaje para recoger las aguas excedentes de riego y evitar la salinización del suelo y su anegamiento.

Acciones Futuras

Uno de los principales retos a futuro, para asegurar la sustentabilidad de la explotación de ésta unidad acuífera, es la de poder determinar, con mayor grado de certeza, la fuente de recarga y la magnitud de la misma.

Debido a que las investigaciones geofísicas no han dado buenos resultados, a que los costos de las perforaciones de investigación son elevados y a que los permisos de perforación necesarios requieren de tiempos demasiados prolongados de resolución, se propone investigar este aspecto mediante el análisis isotópico de muestras de agua del acuífero y de las potenciales fuentes de recarga (agua del río Piura, en el extremo NW de la zona de estudio; agua de las precipitaciones locales y de la zona alto andina, y agua del río Huancabamba).

El desconocimiento del espesor total del acuífero (en profundidad) y/o la posición del substrato impermeable obligan a seguir estudiando, mediante sondeos exploratorios, la geometría de la unidad acuífera, lo cual aumentaría notablemente el potencial volumen del mismo para ser explotado.

Diseñar posteriormente una red de control y monitoreo de niveles y calidad de las aguas para evaluar el comportamiento estacional.

Referencias

- ARCE GEOFISICOS, 2004. Potencial Geofísico Exploratorio de los Acuíferos Regionales Terciarios del Perú. El acuífero Zapallal. Volumen Especial N° 6, *Alberto Giesecke Matto*
- ECSA Ingenieros, 2011. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto de Irrigación Olmos.
- Gobierno Regional Lambayeque, 2011. Mejoramiento del Sistema ecológico de la cuenca del río Huancabamba, tramo aguas abajo del embalse Limón- confluencia río Chotano, en la jurisdicción de los distritos de Pucará y Pomacahua, de la provincia de Jaén-Departamento de Cajamarca.
- Grupo Técnico Regional del Agua Lambayeque – GTRA, 2006. *Lineamiento de Política en la Gestión de Recurso Hídricos de la Región Lambayeque.*
- INGEMMET, 2011. Boletín 140 Geología del Cuadrángulo de Olmos.
- INRENA, 1999. Inventario y Monitoreo de Aguas Subterráneas en el Valle de Olmos – Informe Final.
- NIPPON KOEI, 2009. Estudio de Factibilidad, Preinversión y demás estudios conexos del Proyecto Obras de Conducción y Distribución de Agua de Riego de Olmos.
- Universidad de Piura, 1995. Balance Hídrico Superficial de la cuenca del río Huancabamba.
- Universidad de Piura, 2005. Balance Hídrico Superficial en la Cuenca del Río Cascajal.