

MÉTODOS DE PROTECCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA – AREGUÁ, PARAGUAY

Ylsa Avalos M.¹ ; Santiago Jara G.² ; Georg Houben³

¹ Secretaría del Ambiente, Avda. Madame Lynch 3500, Asunción, Paraguay,

Teléf: +595-21-615805, avalos@ordazur.org

² Secretaría del Ambiente, Avda. Madame Lynch 3500, Asunción, Paraguay,

Teléf: +595-21-615811, sjara@telesurf.com.py

³ Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR), Stilleweg 2, 30655

Hannover, Alemania, Teléf: +49-511-643-2373, georg.houben@bgr.de

Resumen

Areguá, capital departamental del Dpto. Central, situado a 35 Km al ENE de Asunción. Tiene una población de 44.000 hab. según Censo Nacional del año 2002. Se estima que 38.000 hab. tienen acceso al agua potable. La totalidad del abastecimiento proviene de la captación de aguas subterráneas. No existe cobertura de alcantarillado sanitario. Por la topografía de la zona las aguas y sus contaminaciones desembocan finalmente en el Lago Ypacarai.

Geológicamente, el área se encuentra localizada en la Formación Patiño, de edad Cretácica. Estratigráficamente, esta conformada por areniscas rojas afectadas por actividades tectónicas que produjeron la gran falla de Ypacarai (NW-SE). Esta formación, dio su nombre al acuífero principal del área, del cual se produce la extracción de sus aguas por medio de pozos tubulares.

La presencia de bacterias coliformes en estas aguas, es preocupante, y es indicador de los procesos de contaminación creadas por diferentes actividades humanas y

falta de un saneamiento básico. La falta de criterios técnicos de construcción de los pozos sépticos, y un desarrollo sin control de industrias, talleres y curtiembres en toda la región, son las principales fuentes de ingreso de las contaminaciones a las aguas subterráneas.

Esta situación, llevó a la necesidad de realizar un proyecto de investigación sobre el comportamiento de esta fuente de abastecimiento, respecto a los impactos producidos por el uso de dicho recurso. Esto motivó a la Secretaría del Ambiente y a la cooperación técnica de la BGR, encargada del proyecto Ordenamiento Ambiental de Zonas Urbanas (ORDAZUR), al estudio hidrogeológico en dicha área.

Los objetivos que se pretenden alcanzar en esta actividad son, en una primera fase: relevar datos como niveles de agua subterránea, construir un mapa piezométrico, datos climáticos y químicos, como también pruebas de bombeo; en una segunda fase: construir un modelo matemático con MODFLOW, y la delimitación de zonas de recarga y de protección; y en una tercera fase: elaborar una propuesta de Ordenanza Municipal de protección de fuentes para una futura implementación.

Palabras-llaves: Contaminación de Aguas Subterráneas; Modelo Matemático; Zonas de Protección

Abstract

Investigation of groundwater and delineation of well-head protection zones in Aregua, Paraguay: The city of Aregua is the capital of Paraguays Departamento Central and located about 35 km ENE of Asuncion. After data of the 2002 census, it has a population of about 44,000, of which 38,000 have access to potable water. Groundwater is the exclusive source for all drinking water. Neither a sewerage network nor sewage water treatment exist. All surface waters and groundwater of the region enter into Lake Ypacarai where the anthropogenic pollutants have a caused a serious deterioration of water quality.

The study area is dominated by the Patiño formation, a sandstone layer of cretaceous age. It is affected by tectonic activities resulting in NW-SE trending fault lines such as the Ypacarai fault. The Patiño formation is also the main aquifer from which water is extracted mainly by tube wells.

The presence of coliforme bacteria in many wells is an indicator of anthropogenic activities and especially of the absence of a sewage system. The septic tanks in use are of the most primitive design. The uncontrolled development of industry, workshops and tanneries adds to the contamination of the ground water.

This situation initiated a study of the water resources in the region including an assesment of the impacts of human activities. The hydrogeological investigations were carried out by the SEAM in collaboration with BGR in the framework of the project ORDAZUR (Environmental Planning in Urban Zones).

The project consists of three phases. The first phase was dedicated at creating and improving the hydrogeological database (groundwater levels, piezometric map, climate data, chemical analyses, pumping tests). The second phase comprised a mathematical flow model (using MODFLOW), and the delineation of catchment areas and protection zones for individual wells. In the third, future phase, these informations are sought to be implemented by the local authorities by allocating and enforcing protection zones.

Keywords Groundwater Contamination; Mathematical Model; Protection Zones

1. Geología del Área de Investigación

El distrito de Areguá, área de investigación de este estudio, es parte de la cuenca del Lago Ypacaraí (Figura 1.1). Los datos más destacados del Lago Ypacaraí y de su cuenca se resumen en Tabla 1.1.

El área de investigación está dividido geológicamente en dos bloques evidenciados por una gran falla tectónica de dirección NNW-SSE (Fig. 1.2). Al suroeste de ésta línea de falla se encuentra el bloque alto y al noreste el bloque bajo. El límite occidental del área de investigación es el arroyo Yuquyry.

El bloque bajo está comprendido por humedales escasamente poblados en el área de transición con el Lago Ypacaraí. En su formación han contribuido considerablemente los suelos orgánicos, arcillosos y poco permeables propios del lugar.

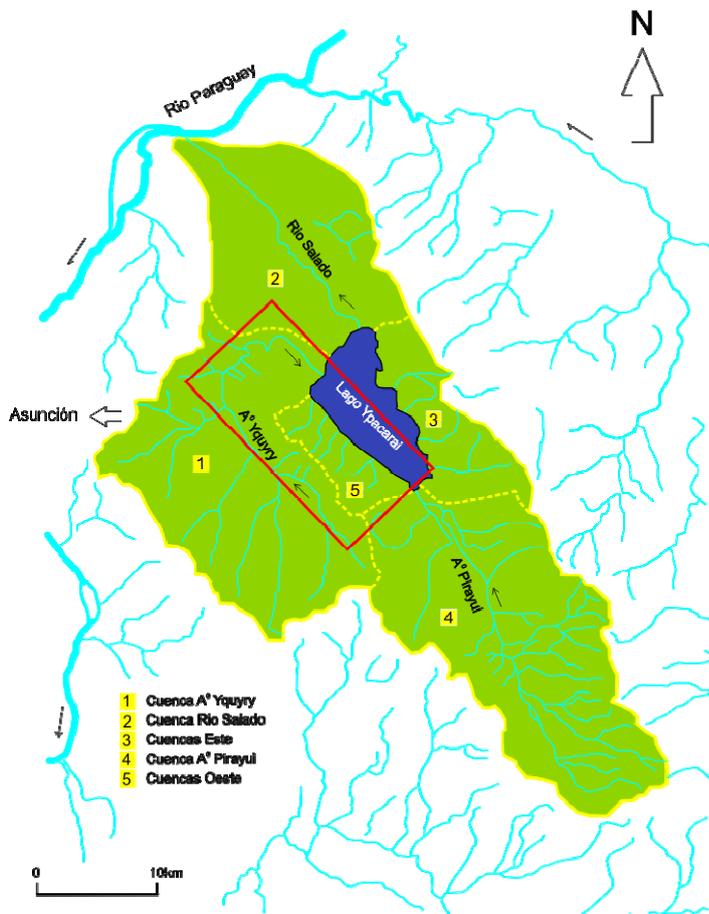


Figura 1.1: Mapa Sinóptico de la Cuenca del Lago Ypacaraí (en rojo: área de este estudio).

Por la escasa población y la reducida cantidad de pozos, no se ha investigado con más detalle este sitio.

La base geológica del área poblada en el suroeste de la zona del proyecto está conformada por areniscas deltaicas y conglomerados del Ordovícico (Grupo Caacupé, Formación Cerro Jhú) que afloran en los dos cerros presentes en el área de estudio y que por sus características hidráulicas (Acuífero Itacurubi/Caacupé) son utilizados para el abastecimiento de agua potable. Estos conglomerados Cretácicos y areniscas se hallan en discordancia con respecto a los del Grupo Asunción conocidas como Formación Patiño que también por su permeabilidad y capacidad de entrega son utilizados como acuíferos (Acuífero Patiño).

Tabla 1.1: Datos básicos del la cuenca del Lago Ypacarai (según datos de ILEC)

Lago Ypacarai		
Superficie	59,6	km ²
Volumen	0,115	km ³
Profundidad máxima	3	M
Profundidad promedio	2	M
Circunferencia	40	km
Promedio anual de la variación de nivel	0,2	M
Tiempo residencial del agua	0,22	A
Ingreso total de Nitrogeno (N)	758,47	t/a
Ingreso total de Fósforo (P)	303,68	t/a
Volumen extraído (agua potable)	0,015625	M ³ /s

Cuenca del Lago Ypacarai				
Superficie		833		km ²
Población (1982)		207.000		habitantes
Densidad poblacional		249		habitantes/km ²
Uso de la Tierra				
Agricultura	155,2	km ²	65,1	%
Estado natural	542,5	km ²	18,7	%
Urbanizaciones	135,2	km ²	16,2	%

Los suelos del bloque alto en su mayor parte son productos de meteorización de las subyacentes areniscas cretácicas lo que le confiere una permeabilidad relativamente alta, factor crítico desde el punto de vista de la protección del agua subterránea, dado que la contaminación puede penetrar sin demora ni purificación a los niveles saturados y como las distancias a la napa freática están entre 5 y 20 metros como máximo, limitan aún más la capacidad de filtración en la zona no saturada.

2. Datos Base Hidrogeológicos del Área de Investigación

2.1 Acuíferos

El Acuífero Patiño es el más importante de la región y uno de los más importantes del Paraguay. Tiene una superficie aproximada de 1800 km², siendo un área donde viven aproximadamente 2 millones de habitantes (33% de la población total). Asunción, capital del país, se encuentra asentada sobre el mismo y en su mayoría se abastece de este Acuífero lo que produce dos situaciones bien notorias: 1- el fácil acceso de captación y, 2- la falta de cobertura sanitaria y planificación urbana produciendo una exposición a la contaminación antrópica de sus aguas.

En el lado occidental del área de investigación se encuentra la línea divisoria de aguas superficiales. En la zona oriental del Distrito de Areguá, la tercera parte de sus aguas fluyen hacia el Lago Ypacaraí a través de pequeños arroyos, mientras que el resto es drenado, también a través de pequeños arroyos pero al Yuquyry, que a su vez desemboca en el Lago Ypacaraí.

El espesor del Acuífero en Areguá asciende a más de 300 m (FOSTER & GIARDUNO 2002), en tanto que los 16 pozos profundos perforados por el SENASA tienen una profundidad máxima de 150 m. (SENASA 1999). La arenisca es fracturada y no totalmente consolidada de modo que las perforaciones abiertas no son apropiadas. Por eso casi todos los pozos están provistos de caños y filtros (PVC o hierro). En los trabajos de campo realizados se ha hallado un pozo de 103 m. de profundidad, entubado solo hasta los 14 m. y está en desuso, también se ha constatado rupturas y colapso de sus paredes las cuales han taponado el pozo. Se ha encontrado también en un colegio, un pozo de 20 m. de profundidad taponado presumiblemente por piedras que arrojaban los alumnos debido a la falta de protección.

Según datos de monitoreo del SENASA (finales de los años 90) los niveles de agua subterránea en la zona del Acuífero Patiño se encontraban entre 1 y 30 m de profundidad. Se trata en su totalidad de un Acuífero libre con permeabilidad regular a media.

2.2. Concepto de abastecimiento y desagüe del agua

Existen tres tipos de abastecimiento de agua en el área de Areguá. En primer lugar se encuentran los pozos noria, de los cuales el agua es extraída a través de baldes, bobinas y ocasionalmente por motobombas. Generalmente, estos pozos no están cubiertos, en consecuencia, pueden caer polvo y basura, razón por la cual el agua no es apta para consumo humano. Es muy común que en ellos crezcan plantas (helechos) y se desarrollen larvas de mosquitos e incluso animales muertos. A causa de los pocos recursos técnicos y económicos de los pobladores de la zona, la profundidad de los pozos es como máximo 20 m. captándose de este modo aguas superficiales y pasibles de contaminación.

En segundo lugar se encuentran las Juntas de Saneamiento que operan hasta tres pozos con reservorio elevado, abasteciendo a casi 2000 personas por comunidad. La construcción de los pozos son financiados por el Estado (SENASA) a través de préstamos internacionales y la población costea los gastos corrientes. El entorno inmediato de los pozos están cercados y parcialmente asegurados cuyas instalaciones, generalmente permiten la cloración manual. No posee monitoreo de datos hidráulicos o hidroquímicos. Los pozos están ubicados, por lo general dentro de los barrios para minimizar el costo de la red, como también, muy a menudo se forman barrios alrededor de los pozos por falta de un ordenamiento urbano.

En tercer lugar, encontramos las aguaterías, que en principio operan en forma similar a las Juntas pero sin fondos estatales, es decir, son privadas. Según FOSTER & GIARDUNO (2002) éstos cuentan entre 100 y 600 conexiones de agua y bombean entre 150 y 250 l/d por habitante. Esta estimación incluye pérdidas de agua en la red que pueden ser significativas a pesar de las cortas distancias. Como no existe una potabilización de agua más allá de la cloración, pérdidas en la planta (p. Ej. por el lavado de filtros) son relativamente reducidas.

La falta de alcantarillado sanitario es una situación crítica en Areguá. Esto es común en Paraguay, ya que solamente el 6% de la población rural cuenta con una conexión a una red cloacal (FACETTI 2002). Los casi 40.000 habitantes de la zona de investigación, utilizan pozos sépticos y letrinas, razón por la cual los niveles de coliformes fecales y bacterianos son elevados, principalmente en los pozos norias. El brote de enfermedades por causa del agua contaminada es muy común. Las aguas residuales descargan por los arroyos y aguas subterráneas que finalmente entran al Lago Ypacarai, por lo que la carga de nutrientes causa procesos de eutrofización. Según observaciones in situ, hay un brote de algas verdes produciendo un deterioro acelerado de sus aguas.

2.3. Hidroquímica

Los análisis hidroquímicos (parciales) de los pozos profundos de los años 90 (SENASA 1999), no muestran (todavía) una contaminación, aunque debe tenerse en cuenta que, los análisis no son completos ni contienen datos microbiológicos ni de

sustancias orgánicas. Según datos de FOSTER & GIARDUNO (2002) el 70% de pozos del Acuífero Patiño están contaminados con coliformes fecales. Los propios análisis de SENASA muestran agua poco mineralizada, típico para aguas en areniscas. Además el tiempo corto de permanencia en el acuífero, que es de esperar, no alcanza para la mineralización. La concentración baja de nitrato, sulfato y hierro, puede indicar un bajo potencial RedOx. La profundidad (> 50 hasta > 90 m) de la cual provienen los estudios, respaldan esta suposición. La eutrofización del Lago Ypacaraí debe entonces tener su origen en sustancias del agua superficial o agua subterránea poco profunda.

2.4 Cálculos del ciclo hidrológico

A través de datos meteorológicos, se dedujo la información sobre la recarga, utilizando promedios mensuales y anuales de precipitación, temperatura y humedad.

La temperatura promedio anual en Asunción, entre 1961 y 1990, fue de 22,5 °C y la media de precipitación entre 1400 y 1500 mm/a (Fig. 2.1, según Wikipedia y SARO 2001, respectivamente). La precipitación más elevada, 150 mm mensual se registra entre Octubre y Abril, con temperaturas medias que oscilan entre 20 y 28°C. Las medias mensuales mínimas de precipitación y temperatura se registran en Julio con 30 mm y 18°C.

Para estimar los valores anuales de evapotranspiración real se puede utilizar la fórmula de TURC (Ecuación 2.1)

$$ET_{reell} = \frac{N}{[0,9 + (\frac{N}{J_t})^2]^{0,5}} \quad (2.1)$$

significando

N	=	precipitación media anual [mm]
J _t	=	300 + 25.t + 0,05.t ³
t	=	temperatura media anual [° C]

La ecuación 2.1 calcula una evapotranspiración anual de aproximadamente 1085 mm, con lo que quedan aprox. 300 mm para la escorrentía superficial y la recarga. Según datos de SARO (N=1500 mm/a, T= 22,5°C) los resultados son: ET= 1060 mm/a, 440 mm/a para escorrentía y recarga.

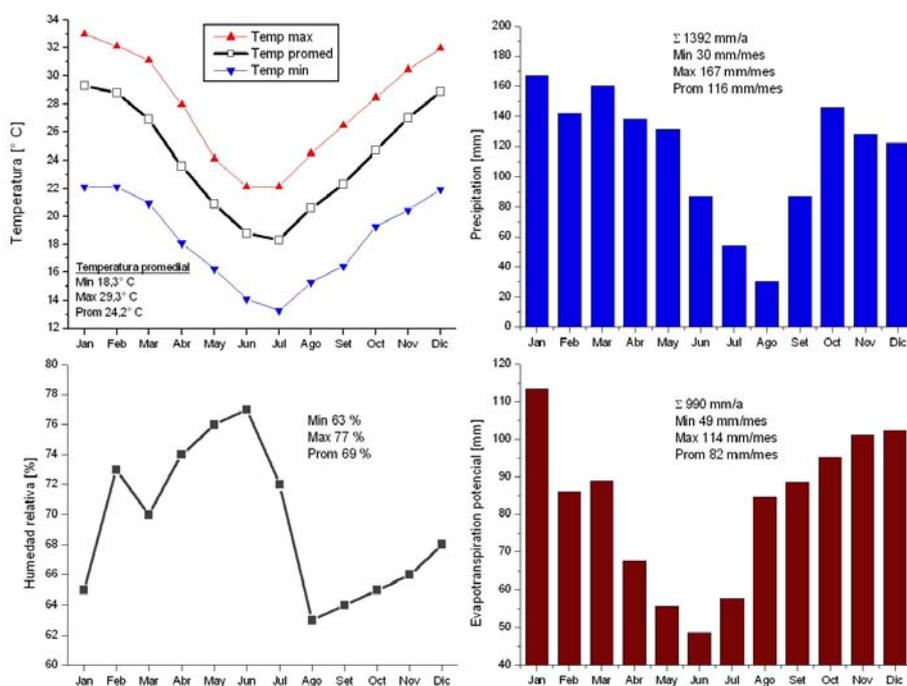


Figura 2.1: Estación Aeropuerto Asunción: Valores medios mensuales de precipitación, temperatura (según Wikipeda, serie no especificada), humedad relativa de aire (según MSN, serie no especificada) y evapotranspiración (calculados según IVANOV) en Asunción.

La recarga se estima en aprox. 200 - 300 mm/a considerando la buena permeabilidad del suelo. Esto coincide con los valores de 300 - 400 mm/a mencionados en FOSTER & GIARDUNO (2002). También el BID (2002) llega a resultados similares. Se estima la evapotranspiración en 1175 mm/a y la recarga en 200 - 500 mm/a, sin mencionar el método de cálculo.

En las zonas urbanas (Asunción), la renovación puede aumentar hasta 500 mm/a a pesar de la impermeabilización de la superficie, por falta de saneamiento básico y a través de pérdidas en las redes de desagües. Si a pesar de altas tasas de

renovación se llega a una extracción mayor a la recarga, solo se sabrá a largo plazo a través del análisis de los niveles freáticos.

En Areguá falta el monitoreo de estos niveles. SENASA en el año 2001 instaló una red de 10 freatómetros en Ñemby. Ellos muestran hasta el año 2002 un descenso de niveles de agua. Desde entonces, por causa de vandalismos, los equipos de medición están fuera de servicio.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial utilizamos el método de IVANOV (Ecuación 2.2). Los datos fueron obtenidos de la Figura 2.1.

$$ET_{pot} = 0,0011 \cdot (T + 25)^2 \cdot (100 - U) \quad (2.2)$$

donde

T = temperatura media mensual [°C]

U = humedad relativa promedio del aire [%J]

Con estos valores también se puede calcular la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial. Se comprueba que, con excepción de los meses de invierno, (Julio - Setiembre) se cuenta con un excedente de precipitación y por lo tanto con una recarga continua.

2.5 Mapa de Isopiezas

El 15 y 16 de Nov. de 2005 se midieron los niveles en 14 pozos -norias y profundos - en el distrito de Areguá. Para conocer las direcciones de flujo natural se consideraron únicamente pozos inactivos. Se suspendió el bombeo de agua de los pozos profundos de las Juntas de Saneamiento 24h antes de las mediciones.

La altura de los pozos se determinó posteriormente con DGPS (GPS diferencial). Los datos permitieron elaborar un mapa simple de las isopiezas (Fig. 2.2).

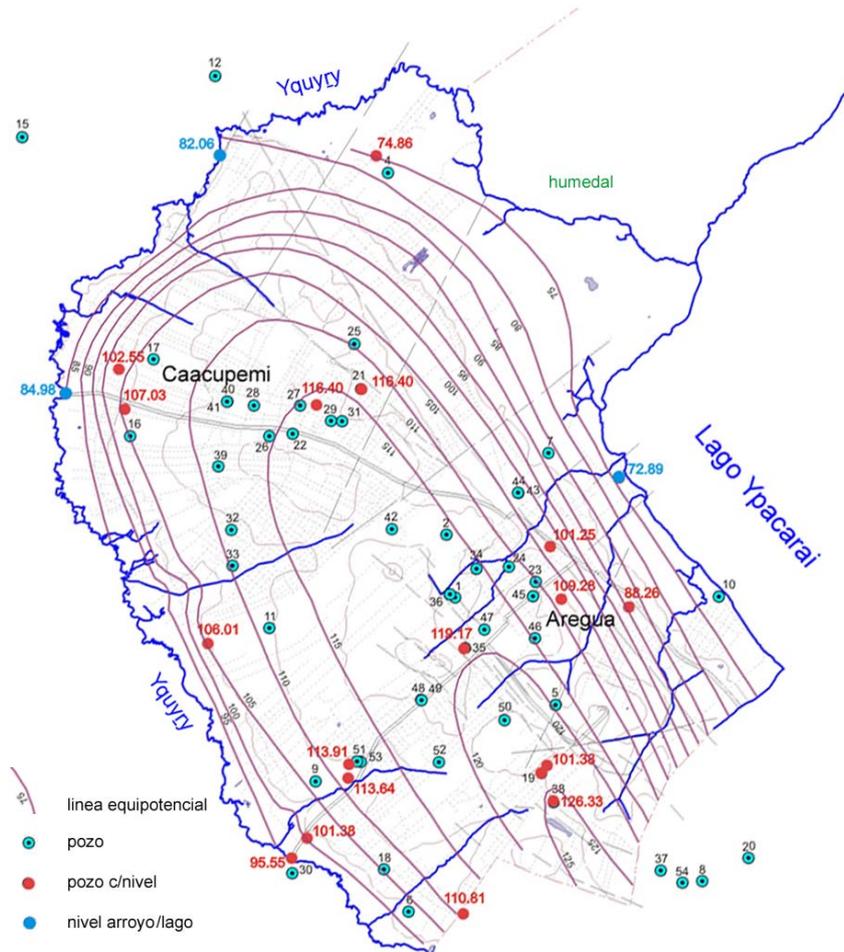


Figura 2.2: Mapa de isopiezas del área de estudio (16 Noviembre 2005).

2.7 Evaluación de ensayos de bombeo

Para determinar la permeabilidad del agua subterránea se analizaron los datos de cuatro ensayos de bombeo de SENASA. La calidad de los ensayos no permite obtener resultados exactos; especialmente el ensayo de bombeo en Isla Valle (OP P0029), que muestra saltos de valores de altura del agua inexplicables, impidiendo una evaluación fiable de los valores. El mejor ensayo se obtiene de Costa Fleitas, con curvas de descenso y recuperación adecuadas.

Las curvas de descenso muestran señales débiles de un sistema de “doble porosidad”; primero se vacían los drenajes preferenciales (grietas) y posteriormente el agua contenida en los poros de las areniscas. El método de evaluación para estos sistemas (MOENCH) no se pudo utilizar, porque no se contaba con un pozo de observación, además de las mediciones en el pozo de bombeo. No quedó otra alternativa que usar el método COOPER-JACOB (tiempo-descenso), más apto para estas condiciones. Para la evaluación se utilizó el primer tramo lineal de la curva de descenso. El promedio de las permeabilidades resultó en $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s. La falta de un pozo de observación impidió el cálculo de la porosidad de las areniscas.

Tabla 2.1: Datos básicos y resultados de los ensayos de bombeo

Nº de pozo	Ubicación	Diámetro [pulgadas]	Caudal Q [m³/h]	M [m]	T [m²/s]	K [m/s] Descenso	K [m/s] Recuperación
CL P0022	Pindolo	3	22,09	100	$1,84 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$5,53 \cdot 10^{-6}$
CL P0025	Costa Fleita	3	24,0	100	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$
CL P0029	Isla Valle	2	15,0	65	$(1,43 \cdot 10^{-4})^*$	$(2,21 \cdot 10^{-6})^*$	$(2,55 \cdot 10^{-5})^*$
CL P0961	Valle Pucú	3	36,65	50	$4,94 \cdot 10^{-4}$	$9,88 \cdot 10^{-6}$	-
					Promedio	$1,31 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$

*No considerado para calcular el promedio

De las curvas de recuperación se pudieron evaluar solamente dos con COOPER-JACOB. En Isla Valle se midió muy poco tiempo y en Valle Pucú no existen mediciones. La permeabilidad promedio es alrededor de $1,3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

La Tabla 2.1 resume los datos básicos y los resultados de los ensayos de bombeo. El valor de permeabilidad, calculado independientemente de las curvas de descenso y recuperación, se utilizó para el modelo de flujo numérico. Se sitúa en el rango superior de las permeabilidades normales de areniscas.

3. Dimensionamiento del área de recarga y protección

3.1 Cálculos de Balance

El área de influencia de un pozo F - por ende el área de protección - es el resultado de la división entre el caudal Q que se extrae y la recarga por área N_b . El caudal de bombeo se calcula según la cantidad de usuarios y su consumo promedio. Se añade el consumo en la planta potabilizadora (despreciable en este tipo de abastecimientos) y las pérdidas en la red (aquí es ventajoso que las redes no sean extensas).

Ejemplo: Pozo de una Junta de Saneamiento

Conexiones: 400 Casas con 5 Personas c/u (= 2000 Personas)

Consumo por persona: 200 l/d (incluye pérdidas en la planta y en la red)

$$Q = 400 \text{ m}^3/\text{d} = 4,63 \text{ l/s} = 146.000 \text{ m}^3/\text{a}$$

Recarga: 300 mm/a = 0,30 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{a}$

$$\text{Dimensión de la zona de recarga F } 490.000 \text{ m}^2 = (0,49 \text{ km}^2)$$

El cálculo del ancho máximo de la zona de recarga se calcula según DARCY:

$$Q = k_f \cdot A \cdot l \quad (\text{Área } A = \text{Ancho} \cdot B; \text{ profundidad } m) \quad (3.1 \text{ a})$$

$$Q = k_f \cdot B \cdot m \cdot l \quad (k_f \cdot m = T) \quad (3.1 \text{ b})$$

$$Q = T \cdot B \cdot l \quad (3.1 \text{ c})$$

$$B = 2 \cdot y \cdot b = Q/(T \cdot l) \quad (3.1 \text{ d})$$

significando:

Q	=	Caudal de extracción del pozo [L ³ /T]
A	=	Área [L ²]
T	=	Transmisividad [L ² /T]
k _f	=	Permeabilidad [L/T]
M	=	Profundidad del acuífero [L]
I	=	Gradiente hidráulico promedio [-]

Con la ecuación 3.2 se calcula la distancia al límite inferior de la cuenca de la siguiente manera (MULL & HOLLÄNDER 2002):

$$x_u = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot T \cdot I} \quad (3.2)$$

Un caudal de bombeo de $4,63 \cdot 10 \text{ m}^3/\text{s}$, una permeabilidad K estimada en $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, una profundidad total de 100 m del acuífero y un gradiente hidráulico de 0,01 (que es bastante alto) resultan en un ancho de 460 m y una distancia al límite inferior de la zona de recarga de 74 m. La zona de recarga tendría entonces un largo total de 1,5 km aproximadamente.

La velocidad promedio v_a del agua subterránea en la zona de recarga es, tomando como porosidad n_e 10 % (0,1) y los valores mencionados antes en la ecuación 2.5:

$$v_a = (k_f/n_e) \cdot I \quad (3.3)$$

aproximadamente $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} = 0,0864 \text{ m/d} \approx 8,64 \text{ cm/d}$. Para asegurar la eliminación de la contaminación microbiológica hace falta un tiempo mínimo de 50 días ($d = 50$).

Según el cálculo, el radio del área de protección sería de 5m, resultando un área reducida que ya se halla incluida en a zona de protección cercada. Aumentando el gradiente hidráulico a 0,1 la velocidad promedio del agua es 0,864 m/d. Considerando dichos valores, el radio del área de protección sería de 45 m. No se incluyen en este cálculo permeabilidades preferenciales (grietas, fallas, etc). Si existieran grietas o fallas, el área de protección resultaría mayor en esa dirección.

3.2 Modelación Numérica

Para investigar la hidráulica del agua subterránea en el distrito de Areguá se desarrolló un modelo estacionario simple del flujo con PROCESSING MQDFLOW (PM WIN, Versión 5.3.0, CHIANG & KINZELBACH 2001). No obstante las simplificaciones necesarias por la falta de datos, el modelo refleja correctamente los siguientes aspectos:

- Dirección del flujo del agua subterránea
- Ubicación del límite subterráneo de la cuenca
- Niveles cercanos a la superficie del agua subterránea cerca de arroyos, niveles profundos lejos de los arroyos

Tabla 3.1: Parámetros del modelo numérico

Parámetro	Abreviación	Valor	Unidad
Grilla del modelo		160 x 160	celdas
Tamaño de la celda		50 x 50	m
Permeabilidad	K	$1,30 \cdot 10^{-5} *$	m/s

		$7,35 \cdot 10^{-6}^{**}$	m/s
Profundidad	M	150	m
Recarga	N	300 = $9,5 \cdot 10^{-9}$	mm/a m ³ /s
Porosidad	n	0,10	-

* = valor inicial

** = valor determinado por la calibración

Con los niveles del agua medidos en los pozos, se calibró el modelo con PEST. Se utilizaron los niveles medidos en noviembre de 2005 en pozos en descanso. Dos valores fueron descartados por su discrepancia con los valores medidos en el campo (Nivel del agua encima de la superficie de terreno). La calibración resultó en $7,35 \cdot 10^{-6}$ m/s. Este valor concuerda con los valores para areniscas descritos en la bibliografía y es menor por un factor de 1,77 que el valor determinado de los ensayos de bombeo. Con todas las inexactitudes del modelo y de los ensayos, son posibles y aceptables errores de este orden. Se nota que las mayores diferencias se detectan en los lugares bajos en las cercanías del Yuquyry, cuyos niveles y pendiente se basan en solamente tres datos medidos con DGPS, y una interpolación lineal. Los niveles altos, lejos del arroyo coinciden bastante bien.

Además de un modelo sin influencia humana se calculó un modelo con 30 pozos en funcionamiento (figura 3.1 a,b). Según SENASA (1999 y comunicación verbal, 2005) el promedio del caudal de bombeo es de 3 l/s: 2,84 Mio. m³ anuales en total. Eso se corresponde con la población (40.000 hab.) y un consumo de 200 l/d; que resulta en 2,92 Mio. m³ anuales. Pozos norias fueron excluidos de estos cálculos por su consumo mínimo.

El área de recarga de un pozo es similar en tamaño al área calculada con los modelos analíticos. El ancho es de aproximadamente 300 m y la longitud total 1300 m. En las zonas más densamente pobladas, por ejemplo en la ciudad y en

Caacupemí, la distancia entre los pozos es menor que el ancho promedio del área de recarga. Por tal razón, las áreas se superponen y los modelos analíticos no son válidos, las áreas en general son más angostas y largas (figura 3.1 b).

Una sobreexplotación del agua subterránea no ocurre actualmente por el consumo reducido. Solamente una cuarta parte de la reserva dinámica se utiliza. Eso se nota en la similitud de los flujos en las figuras 3.1 a y 3.1 b (situación sin y con pozos). Las mediciones de aforo en el Yuquyry muestran que el caudal calculado por el modelo está en el orden medido. La suposición que el Arroyo Yuquyry y el Lago Ypacarai son bordes fijos se verifica. La diferencia de nivel del lago entre años secos y húmedos es menor a dos metros, porque cuenta con una salida natural, por el Río Salado. (JICA/FUNDAINGE/CITEC-FIUNA 2005). En el Yuquyry se cuenta aún en meses de sequía con un caudal básico, el cual se origina con el agua subterránea ingresando (JICA/FUNDAINGE/CITEC-FIUNA 2005).

Tabla 3.2: Balance del agua subterránea del modelo numérico.

	Sin pozos			con 30 pozos**		
	m ³ /s	10 ⁶ m ³ /a	% *	m ³ /s	10 ⁶ m ³ /a	% *
Recarga	0,389	12,26	100	0,389	12,26	100
consumo de los pozos	0	0	0	0,093	2,90	24
flujo de agua subterránea directo al Lago Ypacarai	0,113	3,56	29	0,091	2,87	23
flujo del agua subterránea directo al Arroyo Yuquyry	0,275	8,67	71	0,205	6,46	53

* de la recarga total ** agua bombeada se calcula como pérdida (sin recarga del agua servida al arroyo o al agua subterránea)

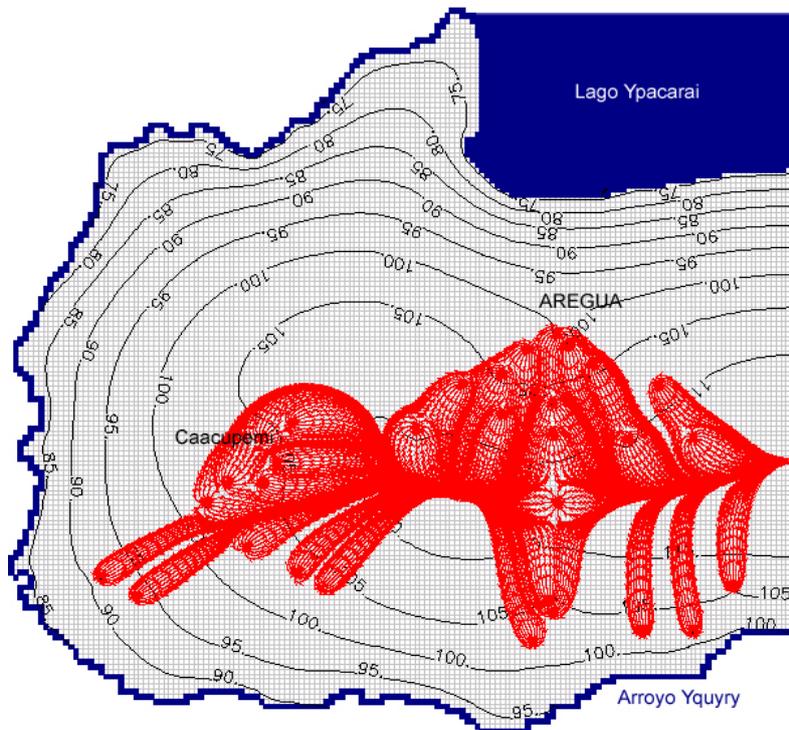
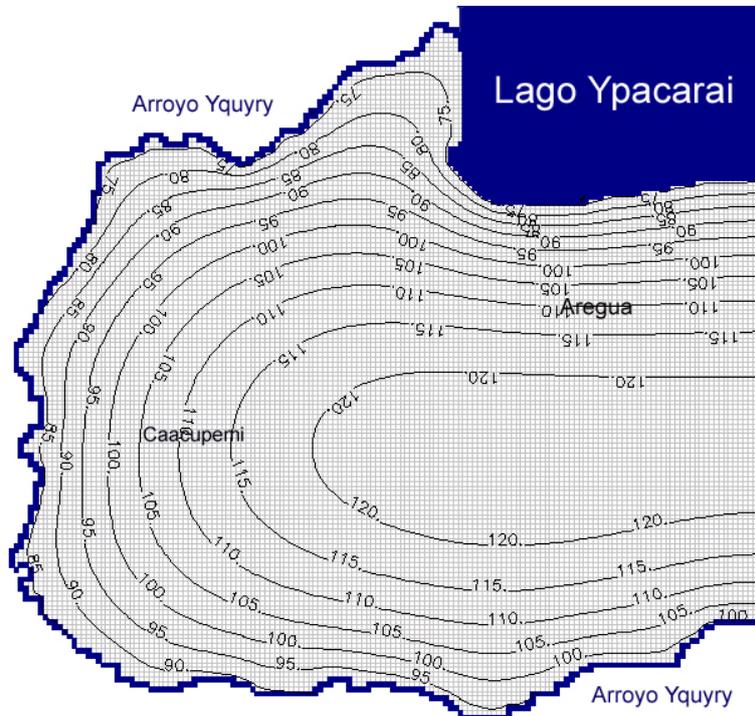


Figura 3.1 a, b: Modelo de las isopiezas en el distrito de Areguá sin (a) y con (b) pozos ($Q = 0,003 \text{ m}^3/\text{s}$ cada pozo). $K = 7,35 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$; recarga = 300 mm/a, niveles del Lago Ypacarai y del Arroyo Yuquyry medidos con DGPS. La pendiente del Yuquyry se interpoló entre los puntos de medición. Las flechas azules muestran la dirección del flujo del arroyo. Una celda mide 50 x 50 m.

El descenso de la napa debido al bombeo en el caso que se solapen varias áreas de recarga es de 12 m (figura 3.2). Será posible optimizar la ubicación de nuevos pozos, respetando una distancia mínima a pozos existentes. El área de descenso de ambos pozos debería solaparse. La ubicación en el flujo del agua subterránea tiene que ser considerada.

Según nuestra experiencia las distancias mínimas entre los pozos deben ser:

- ❖ mayores a 300 m de ancho (pozos perpendiculares al campo de flujo), y
- ❖ mayores a 1500 m de largo (pozos alineados en el campo de flujo).

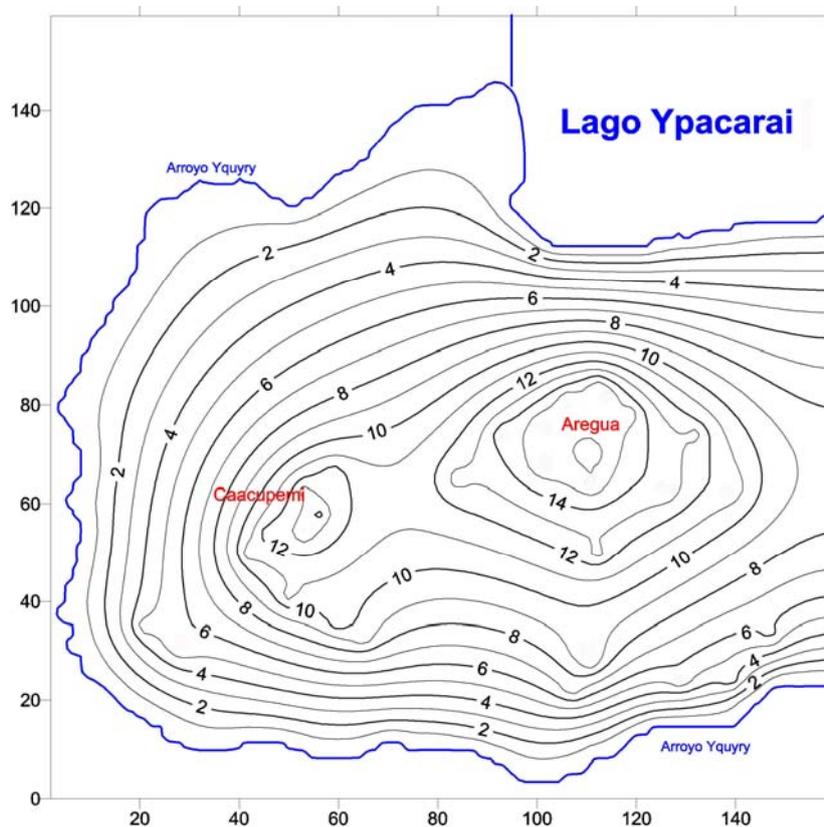


Figura 3.2: Descenso de los niveles por la operación de los pozos profundos de agua potable en el distrito de Areguá (diferencia de los niveles entre figura 3.3a y 3.3 b). Unidades de ejes X e Y: km.

4. Resumen

Se ha intentado elaborar métodos sencillos para la protección de las aguas subterráneas en el distrito de Areguá. Los modelos numéricos sencillos de flujo son adecuados para determinar la geometría de las zonas de ingreso y áreas protegidas.

Para evaluar flujos de agua subterránea no estacionarios serían necesarios los siguientes ítems:

- Mediciones multitemporales: cotas de aguas superficiales y subterráneas
- Determinación: porosidad del Acuífero Patiño.

En la zona de investigación no existe una sobreexplotación por la alta tasa de recarga.

La ausencia de un tratamiento de las aguas negras es la mayor amenaza para la calidad del agua. El suelo muy permeable y el acuífero tienen poca capacidad de retener la contaminación.

Deficiencias en la construcción de los pozos antiguos facilitan el ingreso de contaminantes al acuífero. Por tal razón, en muchos pozos se encuentran bacterias coliformes. Para reducir la carga de materia orgánica, las casas ubicadas en la inmediación de pozos deberían priorizar la conexión al alcantarillado sanitario o contar con un sistema descentralizado de depuración eficiente (con tres cámaras o sistemas similares). Considerando las restricciones económicas, la financiación de estas medidas será difícil. Para el futuro es importante considerar en la planificación urbana una distancia mínima entre el pozo y la próxima casa, ubicando el pozo de

manera que la mayor parte de su zona de recarga se encuentre fuera de la zona urbana.

5. Bibliografía

- BID = BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO (2002): Paraguay - Estudios de Políticas y Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en el Área Metropolitana de Asunción - Paraguay.- Bericht TC-00-12-02-8-PR: 25 p.
- CHIANG, W.-H. & KINZELBACH, W. (2001): 3D-Groundwater Modeling with PMWIN; 346 p.; Berlin/Heidelberg (Springer).
- DGEEC = DIRRECCION GENERAL DE ESTADISTICA, ENCUESTAS Y CENSOS (2002): Censo 2002 - Paraguay Urbano - Resultados Preliminares.- Informe, 88 S.; DGEEC.
- FACETTI, J.F. (2002): Estado Ambiental del Paraguay - Presente y Futuro.- 236 p.; Asuncion (SEAM/GTZ).
- FOSTER, S. & GARDUÑO, H. (2002): Actual and potential regulatory issues relating to groundwater use in Gran Asuncion.- Bericht GW MATE/ World Bank: 6 p.; <http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/903930-112350741998/20424308/CP3Asuncion.pdf>
- INTERNATIONAL LAKE ENVIRONMENT COMMITTEE (ILEC): Lake Ypacarai.- <http://www.ilec.or.jp/database/sam/sam-08.html>
- JICA/FUNDAINGE/CITEC-FIUNA (2005): Investigación de las Condiciones hidrológicas y geológicas de la Cuenca del Lago Ypacarai – Monitoreo en la Cuenca del Arroyo Yuquy.- Informe Técnico Final: 143 p.
- MULL, R. & HOLLÄNDER, H. (2002): Grundwasserhydraulik und -hydrologie: Eine Einführung.- 247 p.; Berlin/Heidelberg (Springer).
- SARO (2001): Proyecto Sistema Ambiental de la Región Oriental del Paraguay - SARO.- Informe Técnico Final, 142 p. + CD; San Lorenzo (SEAM/BGR).
- SENASA (1999): Banco de Datos de Pozos Perforados por SENASA.- Publicación Técnica No. 2, 203 p; (Ministerio de Salud y Bienestar Social).