

Instituto Holandés de Geociencias Aplicadas TNO  
- Servicio Geológico Nacional

Informe de TNO

“Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA”

Estudio del Acuífero Patiño – Informe técnico 2.1:

## Sinopsis del estudio

Fecha

Marzo del 2001

Autor

Jac A.M. van der Gun

Netherlands Institute of  
Applied Geoscience TNO  
P.O.Box 6012  
2600 JA Delft  
The Netherlands  
www.nitg.tno.nl

Código del proyecto

005.50363

Código del contrato

Contrato No 28/2000

Contratante

Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA)

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced and/or published by print, photoprint, microfilm of any other means without the previous written consent of TNO.

In case this report was drafted on instructions, the rights and obligations of contracting parties are subject to either the Standard Conditions for Research Instructions given to TNO, or the relevant agreement concluded between the contracting parties. Submitting the report for inspection to parties who have a direct interest is permitted.

© 1998 TNO

Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO has main offices in Delft and Utrecht and branch locations in Heerlen, Nuenen and Zwolle.

The Institute is the central geoscience institute in the Netherlands for information and research on the sustainable management and use of the subsurface and its natural resources.

Netherlands Organization for  
Applied Scientific Research TNO

The standard Conditions for Research Instructions given to TNO, as filed at the Registry of the District Court and the Chamber of Commerce in The Hague shall apply to all instructions given to TNO.

## **Resumen**

El presente informe resume el estudio del Acuífero Patiño realizado dentro del marco del Proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” (FEHS). Para tal efecto presenta un sinopsis de los resultados de las diferentes actividades que se describen en mayor detalle en los Informes Técnicos 2.2 a 2.9. Además y sobre todo, trata de integrar la información, sacar conclusiones y formular recomendaciones para el uso sostenible y la protección adecuada del Acuífero Patiño.

Conforme a lo sugerido en los Términos de Referencia, se ha estudiado el Acuífero Patiño a través de una zona piloto que corresponde a las cuencas hidrográficas de los arroyos Mbocayaty y Ñemby. Dentro de esta Zona Piloto se ejecutaron trabajos de campo bastante intensivos, mientras que en otras partes del Acuífero Patiño el trabajo de campo fue limitado al muestreo y análisis de muestras de agua.

El estudio ha aumentado considerablemente la información existente y ha dado lugar a nuevas ideas con respecto a ciertos aspectos de las aguas subterráneas del Acuífero Patiño. La información ha permitido identificar temas importantes para la explotación racional y la protección adecuada de las aguas subterráneas. En este contexto se formularon prioridades para trabajos posteriores, presentadas en forma de recomendaciones.

## Contenido

Resumen .....	i	
Lista de figuras .....	iv	
Lista de tablas .....	v	
1	Introducción .....	1
2	Metodología y actividades llevadas a cabo .....	4
2.1	Programación de las actividades .....	4
2.2	Análisis de información existente .....	4
2.3	Trabajo de campo .....	5
2.4	Procesamiento e interpretación de los datos .....	7
2.5	Evaluación .....	7
3	El Acuífero Patiño .....	8
3.1	Características generales .....	8
3.2	El sistema acuífero .....	10
3.3	Régimen hídrico subterráneo .....	12
3.4	Calidad de la aguas subterráneas .....	13
4	La aguas subterráneas en la Zona Piloto .....	16
4.1	La Zona Piloto .....	16
4.2	El sistema acuífero .....	17
4.3	Régimen hídrico subterráneo .....	20
4.4	Calidad de las aguas subterráneas .....	23
4.5	Extrapolación a otras partes del Acuífero Patiño .....	26
5	Implicaciones para la explotación racional y la protección de las aguas subterráneas .....	28
5.1	La planificación racional de nuevos pozos de explotación .....	28
5.2	Diagnóstico con relación al control y a la protección de las aguas subterráneas .....	28
5.3	La Zona Piloto como zona experimental .....	30
6	Conclusiones .....	31
6.1	Con respecto al estudio llevado a cabo .....	31

6.2	Con respecto a la explotación racional y la protección de las aguas subterráneas del Acuífero Patiño.....	31
6.3	Con respecto a dudas y falta de información.....	32
7	Recomendaciones .....	33
7.1	Con relación a la planificación racional de nuevos pozos para la extracción de agua subterránea .....	33
7.2	Con relación al riesgo de la salinización .....	33
7.3	Con relación al riesgo de polución .....	33
7.4	Con relación al riesgo de la sobre-explotación.....	34
7.5	Con relación a la Zona Piloto .....	34
8	Referencias.....	35

## Lista de figuras

Figura 1.1	Ubicación del Acuífero Patiño y de la Zona Piloto .....	3
Figura 3.1	Columna estratigráfica de la ‘Antiforma de Asunción’ (según Gomez, 1991) .....	9
Figura 3.2	Nivel piezométrico en el Acuífero Patiño.....	12
Figura 3.3	Conductividad eléctrica (microsiemens/cm) .....	14
Figura 4.1	La Zona Piloto .....	16
Figura 4.2	Mapa de la distribución de los cuatro grupos de sondeos geoelectricos, representando la constitución (hidro-)geológica.....	18
Figura 4.3	Corte geo-eléctrico de rumbo SW – NE por la Zona Piloto .....	19
Figura 4.4	Nivel estático del agua subterránea, en msnm. ....	21
Figura 4.5	Balance hídrico subterráneo anual .....	22
Figura 4.6	Conductividad eléctrica de las aguas en pozos profundos (en $\mu\text{mho/cm}$ ) .....	23
Figura 4.7	Fuentes potenciales de contaminación puntual.....	24
Figura 4.8	Mapa de vulnerabilidad “DRASTIC” .....	25
Figura 4.9	Mapa tentativo del riesgo de polución.....	26

## **Lista de tablas**

Tabla 1.1	Informes del Volumen 2 “Estudio del Acuífero Patiño” .....1
-----------	---



## 1 Introducción

El presente informe forma parte del Volumen 2 “Estudio del Acuífero Patiño” de los informes técnicos del proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” (FEHS). Los dos otros volúmenes corresponden al “Desarrollo del Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos” (Volumen 1) y a “Metodologías y Capacitación” (Volumen 3).

El objetivo del informe es en primer lugar resumir los resultados del Estudio del Acuífero Patiño llevado a cabo dentro del marco del Proyecto FEHS. Los detalles se describen en los ocho otros informes del Volumen 2 “Estudio del Acuífero Patiño”, listados en la Tabla 1.1. Además y fundamentalmente, trata de integrar la información, sacar conclusiones y formular recomendaciones para el uso sostenible del Acuífero Patiño.

Tabla 1.1 Informes del Volumen 2 “Estudio del Acuífero Patiño”

Informe no.	Título
2.1	Sinopsis del estudio
2.2	Resumen de trabajos y estudios previos
2.3	Inventario de pozos y manantiales en la Zona Piloto
2.4	Investigación geoelectrica en la Zona Piloto
2.5	Pozo exploratorio en la Zona Piloto
2.6	Condiciones geohidráulicas en la Zona Piloto
2.7	Monitoreo piezométrico en la Zona Piloto
2.8	Riesgo de polución en la Zona Piloto
2.9	Calidad de las aguas del Acuífero Patiño

La Figura 1.1 muestra la ubicación y la extensión de la zona que en el presente estudio corresponde al “Acuífero Patiño”. Los riesgos anticipados de sobreexplotación y polución de esta zona densamente poblada (Villar y otros, 1996) han dado lugar al presente estudio. En el diseño del estudio se ha optado para concentrar mayor parte de los trabajos de campo una Zona Piloto y usar las informaciones y conclusiones respecto a la misma zona para orientar las ideas con respecto a todo el Acuífero Patiño. Como tal se seleccionó la cuenca hidrográfica relativamente pequeña de los arroyos Ñemby y Mbocayaty, zona comprendida entre el Río Paraguay y los centros de Fernando de la Mora y San Lorenzo. La Zona Piloto tiene 45 km<sup>2</sup> de extensión.

El estudio no solamente fue iniciado por la importancia de aumentar información acerca del Acuífero Patiño, sino también como primer ejemplo de estudios regionales de las aguas subterráneas ejecutados bajo responsabilidad del SENASA. El Departamento de Recursos Hídricos considera que es necesario embarcar un programa de estudios regionales para la planificación racional y la protección de los recursos subterráneos.

#### *Agradecimientos*

El autor agradece a SENASA, y particularmente a todos los colegas del Departamento de Recursos Hídricos bajo la jefatura del Lic. Félix Villar, por la buena y entusiasta cooperación continuamente recibida durante el estudio y por el apoyo efectivo prestado para facilitar los trabajos. Se reconoce también la dedicación profesional incesante de los colegas de TNO y Hidrogeocol, la cual fue indispensable para llevar a cabo y concluir los trabajos dentro de un lapso de tiempo muy limitado.

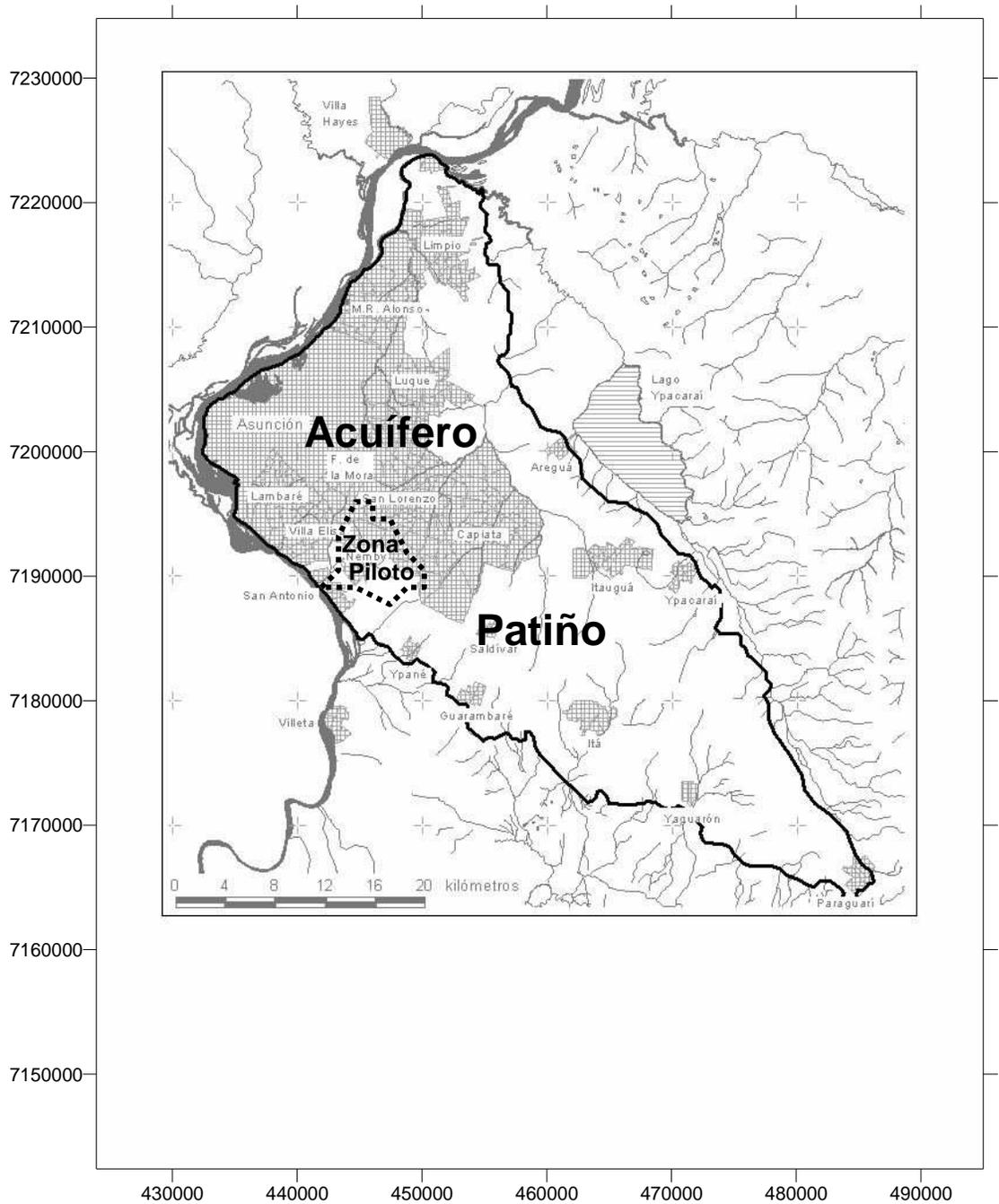


Figura 1.1 Ubicación del Acuífero Patiño y de la Zona Piloto

## **2 Metodología y actividades llevadas a cabo**

### **2.1 Programación de las actividades**

La programación de las actividades del Estudio del Acuífero Patiño fue realizado ya a grandes rasgos en la propuesta del Instituto Holandés de Geociencias Aplicadas TNO (TNO, 2000) para la Consultoría para el Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA. Sigue las instrucciones de los Términos de Referencia correspondiente (SENASA, 2000), con algunas modificaciones. La modificación más grande fue la inclusión de una red de pozos de observación piezométrica en la Zona Piloto. A inicios del proyecto se ha detallado la programación y posteriormente hubo algunos ajustes del período de ejecución.

Las actividades específicas fueron seleccionadas con el criterio de obtener la información técnica requerida para la planificación de la explotación, el control y la protección de las aguas subterráneas en la Zona Piloto. Dicha información se clasificó de la siguiente manera:

- Geometría del sistema acuífero (profundidad, espesor, capas, límites)
- Litología de las capas hidrogeológicas
- Características hidráulicas del acuífero
- Régimen de las aguas subterráneas (niveles, recarga, descarga)
- Calidad de las aguas subterráneas
- Explotación y uso de las aguas subterráneas
- Vulnerabilidad del sistema acuífero

La metodología puede utilizarse como modelo para futuros estudios similares en otras partes del país. Algunas categorías de actividades potenciales – por ejemplo el análisis de datos existentes todavía no procesados y el monitoreo de aguas superficiales relacionadas al agua subterránea - fueron poco compatibles con la corta duración y/o el presupuesto del proyecto, por lo tanto no se incluyeron en el diseño. Sin embargo, podrán ser considerados en futuros proyectos, si las condiciones lo permitirán.

### **2.2 Análisis de información existente**

El análisis de la información existente abarcó una decena de fuentes relevantes, entre los cuales los mapas geológicos e hidrogeológicos del Paraguay y sus textos explicativos, un CD, y algunos informes y artículos. El Informe Técnico 2.2 (Van der Gun, 2001a) resume y comenta en forma temática la información presentada en los diferentes informes y publicaciones. Aunque es significativa y diversa la información

existente, es claro también que falta todavía información y análisis más profundo para eliminar dudas existentes, diagnosticar problemas e investigar posibles soluciones, - elementos de la planificación racional y la gestión sostenible de las aguas subterráneas.

## **2.3 Trabajo de campo**

### **2.3.1 Inventario de puntos de agua**

Se hizo el inventario integral de pozos y manantiales presentes en toda la Zona Piloto. En total se ubicaron 164 pozos profundos, 23 zonas de pozos excavados y 8 zonas de manantiales. Con ayuda de mapas topográficos y un sistema GPS se determinaron en cada punto de agua los datos geográficos de referencia, siendo los coordenadas UTM y la altura en msnm. Luego por entrevista se registraron datos administrativos (municipio, sector/barrio, nombre del predio o sitio, propietario del pozo, etc.), datos con respecto a la construcción del pozo y a la bomba y su fuente de energía, al bombeo, y datos respecto al uso del agua (cantidad de agua, tipo de uso, no. de usuarios, etc.). Además se midieron en los sitios donde fue posible algunas propiedades físicas del pozo (caudal instantáneo) y del agua (conductividad eléctrica, temperatura, pH, nivel estático, nivel dinámico). Se utilizaron formularios especiales para facilitar el registro completo y sistemático de la información. Los datos colectados fueron procesados y luego formaron la base para construir mapas y tablas, y para sacar conclusiones con respecto a las aguas subterráneas y su uso en la Zona Piloto. El Informe Técnico 2.3 presenta los detalles al respecto (Molano, 2001a).

### **2.3.2 Investigación geoelectrica**

En la Zona Piloto se llevó a cabo una investigación geoelectrica durante octubre – noviembre del año 2000. Se ejecutaron 50 sondeos eléctricos verticales con el fin de determinar la geometría y otras características del sistema acuifero. Se utilizó la disposición Schlumberger, en casi todos los casos hasta una máxima distancia de 640 m entre los electrodos. Los sondeos obtenidos fueron clasificados en cuatro grupos de curvas, y luego fueron interpretados cuantitativamente, usando un programa de interpretación desarrollado por TNO. Mayores detalles de la metodología y de las actividades desempeñadas se describen en el Informe Técnico 2.4 (Van Overmeeren, 2000).

### **2.3.3 Pozo exploratorio**

Un pozo exploratorio de 300 m de profundidad fue perforado por SENASA en febrero del 2001, en la zona de Villa Elisa. El objetivo principal del pozo fue ampliar los conocimientos del sistema acuifero, especialmente a mayor profundidad, entre otros aclarando las bajas resistividades eléctricas observadas en el estudio geoelectrico en

toda la parte sur, colindante al río Paraguay. Objetivo secundario fue la adquisición de un pozo de observación piezométrica, especialmente con miras al régimen piezométrico de la parte profunda del sistema acuífero. Para cumplir estos objetivos un registro geofísico fue ejecutado por SENASA, se terminó la construcción del pozo con 28 m de filtros en el fondo y entubación de plástico, y se hicieron esfuerzos para remover tanto el lodo de perforación como el agua de inyección. Detalles al respecto se describen en el Informe Técnico 2.5 (Molano, 2001b).

#### **2.3.4 Ensayos hidráulicos**

Se realizaron cuatro ensayos hidráulicos en la Zona Piloto. Inicialmente se tenía previsto efectuar ensayos adicionales en otros pozos en donde se disponía de pozos cercanos que podían ser utilizados como pozos de observación, pero no fue posible que los dueños dieran la autorización para su ejecución.

En uno de los ensayos se midió el nivel del agua en el pozo de bombeo, en los demás se lo hizo en uno o dos pozos de observación. Las pruebas tenían fase de bombeo y fase de recuperación, con excepción de un ensayo donde solamente hubo fase de recuperación. La duración de los ensayos fue de 11 horas a un día y medio. Los resultados fueron interpretados mediante los métodos de Theis, Jacob y Neuman, en un caso también con un modelo numérico de simulación hidráulica. Los detalles metodológicos y los resultados se presentan en el Informe Técnico 2.6, en combinación con una evaluación hidráulica de toda la zona (Molano, 2001c).

#### **2.3.5 Red piezométrica**

Dado el hecho que los pozos existentes en general no son aptos para el monitoreo de los niveles estáticos del agua subterránea, se ha subcontratado la construcción de diez pozos de observación piezométrica, con un total de 550 m perforados. Los diez pozos forman una red inicial satisfactoria para el monitoreo de la zona. Uno de los pozos está provisto con dos equipos “Diver” para el registro automático y electrónico con alta frecuencia de los niveles. Uno está instalado bajo el nivel del agua para efectuar dichas mediciones, el otro está por encima del agua con miras a las debidas correcciones para variaciones de temperatura y presión atmosférica. Los detalles están descritos en el Informe Técnico 2.7 (Molano, 2001d).

#### **2.3.6 Inventario de fuentes potenciales de contaminación**

En la Zona Piloto se llevó a cabo en el campo el inventario de fuentes potenciales de contaminación de las aguas subterráneas. Se ubicaron 65 fuentes potenciales de contaminación, además se observó la presencia de contaminación difusa correspondiente a la infiltración de aguas servidas. Estos datos y la vulnerabilidad estimada del acuífero determinan los riesgos de polución que se describen en el Informe Técnico 2.8 (Molano, 2001e).

### **2.3.7 Muestreo y análisis de la calidad del agua**

Entre inicios de diciembre del 2000 y fines de febrero del 2001 se tomaron 125 muestras de agua en toda la zona del Acuífero Patiño y las vecindades. La mayor parte de las muestras proviene del mismo acuífero, pero un número limitado fue tomado de aguas superficiales. Se analizaron en el laboratorio del SENASA, en forma de análisis físico-químico-bacteriológicos completos para aguas potables. El objetivo fue obtener un imagen regional consistente de la calidad de las aguas del Acuífero Patiño e identificar posibles amenazas. Se procesaron y se evaluaron los datos obtenidos mediante mapas, gráficos y análisis estadísticos, como se explica en el Informe 2.9 (Van der Gun, 2001b).

### **2.4 Procesamiento e interpretación de los datos**

Como primer paso en el procesamiento de los datos se hicieron esfuerzos substanciales para chequear las coordenadas y la altura de los sitios de medición y la calidad de los datos. Luego se utilizaron métodos profesionales actuales para procesar y interpretar los datos, como está detallado en los Informes Técnicos 2.3 a 2.9. En ciertas interpretaciones – como por ejemplo para interpretar los sondeos eléctricos verticales, los ensayos de bombeo y la simulación del flujo regional del agua subterránea - se utilizó software especializado. En muchos casos, sin embargo, se aprovecharon las opciones y la flexibilidad de Excel y SURFER.

### **2.5 Evaluación**

En la evaluación de la información obtenida se ha intentado la integración de toda la información con respecto a la Zona Piloto y se la utilizó – en combinación con otros datos, tanto del proyecto como ya disponibles - para actualizar los conocimientos al respecto de todo el Acuífero Patiño. El objetivo del uso sostenible de las aguas subterráneas ha sido la guía principal para el diagnóstico acerca del Acuífero Patiño y la formulación de recomendaciones para acciones en el futuro.

### **3 El Acuífero Patiño**

#### **3.1 Características generales**

##### **3.1.1 Ubicación y división político-administrativa**

El denominado Acuífero Patiño (véase Figura 1.1) abarca una zona de 1173 km<sup>2</sup> de extensión entre latitudes 25°05' y 25°38' S y longitudes 57°08' y 57°41' W.

Incluye la ciudad de Asunción, la parte norte del Departamento Central y una pequeña parte del Departamento de Paraguari.

##### **3.1.2 Topografía**

La zona tiene forma más o menos triangular y está bordeada en el NO y W por el río Paraguay. Tiene topografía bastante undulante, con dos lineamientos de lomas paralelos a los límites este y sur-oeste. Uno está corriendo de Limpio por Aregua y Ypacaraí a Paraguari, alcanzando a alturas unos 300 m. El otro - con alturas hasta encima de 200 m - empieza en Asunción, pasa por San Lorenzo, cambia al norte de Guarambaré su rumbo hacia el este y se une con el primer en la zona de Ypacaraí. Las partes más bajas del área se encuentran a un nivel alrededor de 60 msnm, en los márgenes del río Paraguay.

##### **3.1.3 Geología y geomorfología**

El Acuífero Patiño se encuentra dentro de una fosa tectónica, en la cual durante el Cretácico Medio hasta finales del Terciario fueron depositadas las formaciones del Grupo Asunción, encima de rocas silúricas. Son sucesivamente la Formación Patiño, la Formación Cerro Perú y la Formación Itapytapunta. Son caracterizadas por areniscas friables de grano grueso a fino – en el caso de las Formaciones Patiño y Cerro Perú teniendo conglomerados en su parte basal. Intrusivos de edad oligocena-miocena penetran localmente los sedimentos del Grupo Asunción. Cerca al río Paraguay, a cotas por debajo de 70 msnm, se depositaron encima del Grupo Asunción la Formación Lambaré (grauwackas) y la Formación San Antonio (arenas, gravas y arcillas). La Figura 3.1 muestra la secuencia estratigráfica.

##### **3.1.4 Clima e hidrología**

Con Asunción y Villarrica como estaciones meteorológicas indicativas de la zona del Acuífero Patiño se puede inferir una precipitación media anual de 1400 a 1500 mm para dicha zona. Las precipitaciones se presentan durante todos los meses del año, pero es notable una variación estacional, con valores mínimos en agosto, máximos en octubre y valores por encima del promedio durante el período de octubre a marzo.

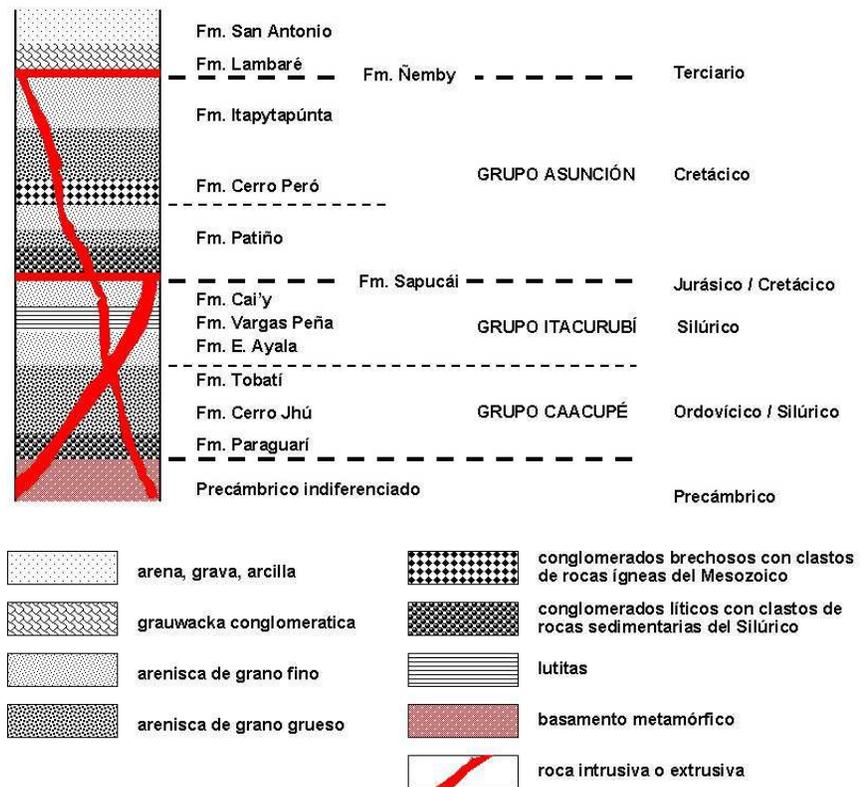


Figura 3.1 Columna estratigráfica de la 'Antiforma de Asunción' (según Gomez, 1991)

El régimen de las temperaturas atmosféricas demuestra una variación de unos 10°C entre las temperaturas medias mensuales máximas en enero y las mínimas en julio. Para la zona del Acuífero Patiño se estima una temperatura media anual de 22 a 23°C y una evapotranspiración potencial media anual de 1175 mm (calculada según Thornthwaite). Los datos permiten inferir que hay excedente de precipitación, especialmente en los períodos abril-junio y septiembre-octubre.

Las lluvias suelen tener intensidad bastante grande en la zona del Acuífero Patiño, y la morfología de la zona es caracterizada por pendientes topográficas hacia las zonas limítrofes. Por lo tanto se observa una red de drenaje divergente bien desarrollada para evacuar el excedente de las precipitaciones pluviales.

Por inspección de los mapas topográficos es posible subdividir la zona del Acuífero Patiño en tres zonas hidrográficas distintas (véase la Figura 1.1):

*Zona 1 (Sistema del Río Paraguay):*

Esta zona es drenada por arroyos que descargan directamente al Río Paraguay. Consiste de una faja de 5-10 km de ancho bordeando el Río Paraguay, incluyendo las zonas urbanas de Limpio, Mariano Alonso, Asunción, Lambaré, Fernando de la Mora, Villa Elisa, San Antonio y Ñemby. Su extensión es de 410 km<sup>2</sup> o sea 35% del área total.

*Zona 2 (Sistema del Lago Ypacaraí/Río Salado):*

Esta zona consiste de la zona central y las zonas a lo largo del borde oriental, incluyendo las zonas urbanas de Luque, San Lorenzo, Areguá, Capiatá, Itaguá, Ypacaraí y Pirayú. Drena hacia el Lago Ypacaraí (zona 2a), hacia el Río Salado que conecta el lago con el Río Paraguay (zona 2c) o hacia la zona pantanosa al norte del lago (zona 2b). Su extensión es de 507 km<sup>2</sup> o sea 43% del área total, con áreas de 152, 314 y 41 , respectivamente, para las subzonas 2a, 2b y 2c.

*Zona 3 (Sistema del Ao Caañabé):*

Ocupa la zona sur, donde se encuentran los centros de Guarambaré, Ita y Yaguerón. Tiene extensión de 256 km<sup>2</sup> o sea el 22% del área total. Las aguas de drenaje de esta zona son conducidos por arroyos hacia el Ao Caañabé, el cual alimenta una zona extensa de pantanos al sur de Nueva Italia.

Aunque el Río Paraguay es la base de drenaje regional para toda el área, es claro que las aguas de drenaje de algunas zonas tienen importancia especial con respecto a las condiciones hidrológicas del lago (zona 2a) y la sostenibilidad de los ecosistemas húmedos de los pantanos (zonas 2b y 3).

**3.1.5 Población y uso de las tierras**

La zona está densamente poblada, especialmente en la parte urbanizada que abarca el oeste y norte. La población total es del orden de dos millones. Gran parte de las tierras es utilizada para fines residenciales e industriales. Son abundantes las zonas verdes y arboladas, también dentro de los límites urbanos.

**3.2 El sistema acuífero****3.2.1 Caracterización**

El Acuífero Patiño está compuesto mayormente de las formaciones pertenecientes al Grupo Asunción, que sobreyacen una base de sedimentos silúricos consolidados. Son

areniscas friables de grano variable, con intercalaciones de conglomerados y fanglomerados. Las formaciones que en los alrededores del río Paraguay se observan encima del Grupo Asunción (Formación Lambaré y Formación San Antonio), a cotas por debajo de 70 msnm, hidráulicamente pueden ser consideradas como parte del mismo sistema acuífero.

En el mapa de Naciones Unidas (1986) el acuífero es clasificado como poroso y de bajo potencial de explotación, es decir con capacidad específica inferior a 1.0 m<sup>3</sup>/h/m. Los datos del SENASA (1999) indican que el caudal específico de los pozos frecuentemente está en el intervalo de 0.5 a 2.0 m<sup>3</sup>/h/m, un poco más favorable que el promedio de 0.8 m<sup>3</sup>/h/m estimado por Naciones Unidas. Condiciones freáticas predominan en el acuífero a escala regional, pero localmente se observan también condiciones semiconfinadas y hasta surgentes.

El sistema acuífero tiene extensión restringida (1173 km<sup>2</sup>), pero su espesor es del orden de algunas centenas de metros. Contrariamente a los acuíferos del Chaco, contiene generalmente agua de muy bajo grado de mineralización, con excepción de algunas zonas cerca al río Paraguay.

### 3.2.2 Límites laterales

Las areniscas del Acuífero Patiño en la zona triangular Asunción-Limpio-Paraguarí están limitadas por fallas en todos sus lados. Al lado este – de Limpio a Paraguarí – se encuentra la falla de Ypacaraí, por la cual dichas areniscas se hallan yuxtapuestas a sedimentos cuaternarios, areniscas paleozoicas, materiales basálticos y rocas del basamento (Bartel y Muff, 1995). Una falla al lado sur ha creado condiciones más o menos similares en esta parte. En el área de Guarambaré a lo largo de esta falla hay intrusiones de la Formación Ñemby que forman localmente una barrera impermeable (Carvallo y otros, 1995). Este fenómeno posiblemente se presenta en otras partes también. Por el contraste en permeabilidad provocado por las fallas y por las condiciones topográficas, se produce descarga de las aguas subterráneas a lo largo de los límites este y sur.

Respecto al límite oeste, la información disponible es más escasa. En rasgos generales el Río Paraguay y el sistema de fallas que definen su curso son considerados como límite occidental. Sin embargo, faltan detalles al respecto en las publicaciones revisadas. Como se observa que existen afloramientos de la Formación Patiño en Villa Hayes y Benjamín Aceval, no es imposible que haya otras extensiones de las areniscas hacia el oeste o noroeste, enterradas bajo los sedimentos más recientes del Chaco. Los mapas y datos disponibles sugieren que hay contacto hidráulico entre el Acuífero Patiño y el Río Paraguay de modo que el último determina los niveles de base en dicho acuífero.

### 3.3 Régimen hídrico subterráneo

#### 3.3.1 Niveles piezométricos

La Figura 3.2 muestra el nivel piezométrico regional deducido de valores de niveles estáticos observados en pozos. Mayor parte de estos pozos son pozos perforados con profundidades entre 50 y 200 m. Los valores fueron determinados en diferentes momentos en el tiempo - muchas veces en el momento de terminar el pozo - y no simultáneamente, ya que pocos pozos se prestan para medir el nivel estático. Sin embargo, el margen de error de presumidamente algunos metros no es muy significativo en vista de la morfología pronunciada del nivel piezométrico. Se observa en la Figura 3.2 que dicho nivel refleja la topografía del área, observándose los niveles piezométricos más elevados en las zonas de lomas y los más bajas cerca al río Paraguay. Es bien marcada la influencia del drenaje por el río Paraguay y por los arroyos principales. Por consiguiente, la dirección del flujo subterráneo es divergente y corresponde en grandes rasgos a la dirección del flujo superficial.

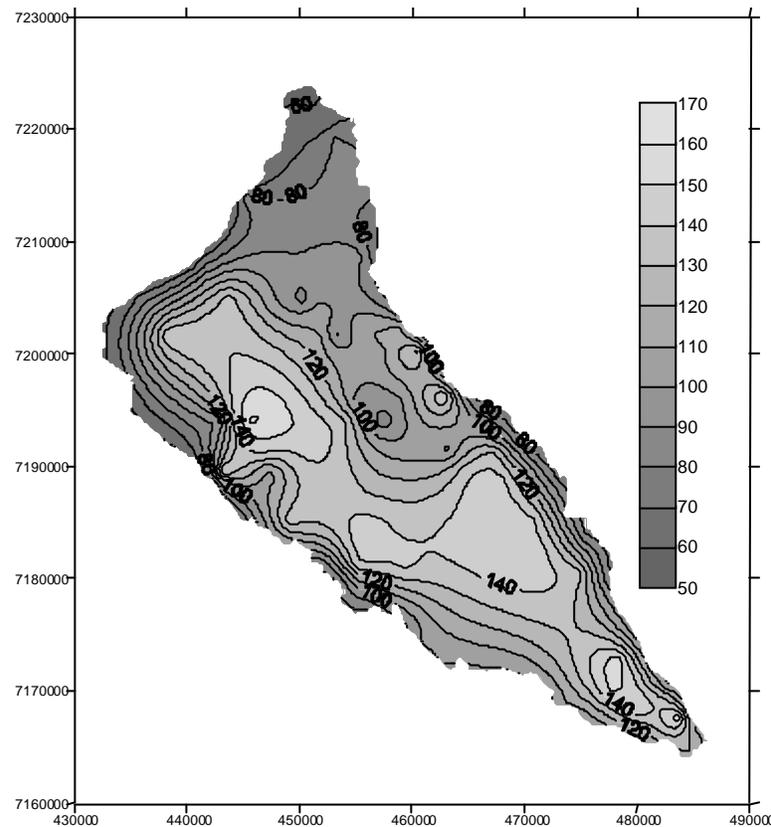


Figura 3.2 Nivel piezométrico en el Acuífero Patiño

### **3.3.2 La recarga de las aguas subterráneas**

Como consecuencia de la morfología del área, el Río Paraguay y otros cuerpos importantes de aguas superficiales (Lago Ypacaraí, Río Salado) no están en condiciones de recargar el Acuífero Patiño. Por lo tanto, la recarga natural del Acuífero Patiño básicamente proviene del excedente de las precipitaciones pluviales locales (recarga directa). Observaciones en el campo mostraron que las aguas remanentes en depresiones del terreno inmediatamente después de chaparrones fuertes suelen desaparecer rápidamente, lo cual indica una buena capacidad de infiltración. Naciones Unidas (1986) estima que la recarga directa en la zona del Acuífero Patiño es de 1 a 2 % de la precipitación media, es decir unos 14 a 28 mm por año, en promedio. Esta tasa de recarga ha sido adaptada por otros autores también, pero como se demostrará en el próximo capítulo, en realidad es probablemente mucho mayor. Componentes adicionales de la recarga son la recarga indirecta por la infiltración de aguas servidas - a menudo contaminada - y por pérdidas de las aguas distribuidas. En esta conexión hay que tomar en cuenta el agua suministrada por CORPOSANA, extraída en cantidades apreciables del Río Paraguay, entonces de una fuente de agua externa.

### **3.3.3 La descarga de las aguas subterráneas**

La descarga del agua subterránea es por una parte por flujos subterráneos directamente al río Paraguay, por otra parte por la exfiltración del agua a los numerosos arroyos de la zona (flujo base) y por evapotranspiración en humedales donde el nivel de agua se encuentra a profundidad somera. Además, el agua subterránea es explotada intensivamente mediante gran cantidad de pozos, que son la fuente de agua potable para gran parte de los dos millones de personas que viven en la zona. Siendo muy obvia todavía la abundante descarga natural y desconocidos los casos de descensos supra-locales apreciables del nivel estático, parece que la tasa de explotación actual del agua subterránea es sostenible.

## **3.4 Calidad de las aguas subterráneas**

### **3.4.1 Variación de los parámetros principales**

En base al análisis físico-químico-bacteriológico de 125 muestras tomadas por el proyecto FEHS, se evaluaron las características principales del agua y se confeccionaron mapas para detectar variaciones espaciales (Van der Gun, 2001b). Como lo demuestra la Figura 3.3, las aguas subterráneas del Acuífero Patiño son en general de baja mineralización, excepto en algunos casos de polución puntual. Sin embargo, en una faja de 2 a 8 km de ancho a lo largo del río Paraguay se ha comprobado o (en otras partes) se asume la presencia de agua salada a partir de cierta

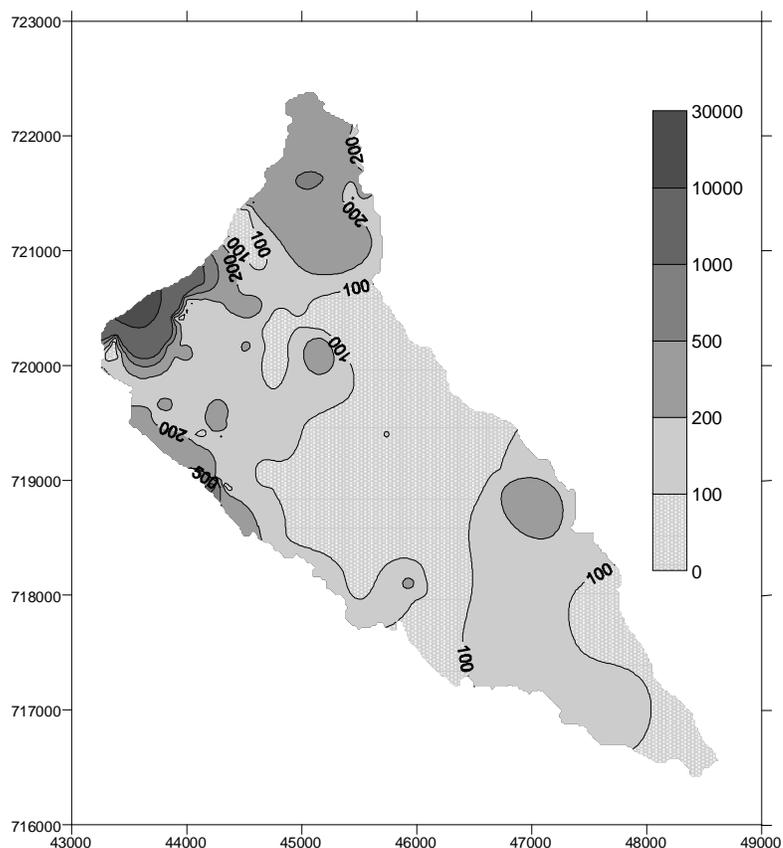


Figura 3.3 Conductividad eléctrica (microsiemens/cm)

profundidad variable. Estas aguas saladas de origen antiguo amenazan la calidad del agua dulce que se encuentra encima y al lado de las mismas. El origen distinto se refleja en las características hidroquímicas de las aguas, caracterizándose el agua salada por el tipo NaCl.

Solamente hay hipótesis no comprobadas con respecto al origen. La más corriente es la intrusión de aguas saladas desde el Chaco pasando por debajo del río Paraguay. Esto no es imposible, pero requiere condiciones geohidráulicas muy especiales, como la existencia de niveles artesianos extremadamente altos en un acuífero confinado profundo o semi-profundo del Chaco, y la presencia de capas poca permeables que prohíben la descarga directa hacia el río Paraguay (base de drenaje regional) y favorecen el movimiento en sentido contrario al fuerte gradiente hidráulico observado en las profundidades explotadas del Acuífero Patino. Otra hipótesis podría ser que la depresión topográfica del río Paraguay ha sido sujeta a transgresión marina durante cierto período después del Cretácico. Es apoyado por la presencia de aguas de tipo

NaCl en partes de la fosa del Lago Ypacaraí. Luego, hay las posibilidades de que el agua salada tiene origen juvenil asociado con las fallas, de que es producto de procesos evaporíticos, o de que se trata de el remanente migrado de las aguas saladas conatas de las formaciones marinas silúricas.

#### **3.4.2 Aptitud para uso de agua potable**

En las mencionadas muestras casi el 70% de las aguas contiene coliformes, las cuales incluyen coliformes fecales en el 28% de las muestras. Esta contaminación bacteriológica, el alto contenido de hierro y la turbidez constituyen las limitaciones principales del agua con respecto a su potabilidad. Comparando con las normas Paraguayas vigentes, el 78% de las aguas muestreadas no es apta para consumo doméstico sin tratamiento previo. Considerando que no se ha determinado todos los componentes mencionados en las normas, es posible que el porcentaje apto para consumo doméstico sea aún más pequeño.

#### **3.4.3 Riesgos de polución**

Con los datos disponibles se puede concluir que el acuífero no tiene mucha protección natural contra el ingreso de contaminantes, entonces tiene vulnerabilidad no despreciable. También son obvios los numerosos fuentes potenciales de contaminación en la zona tan densamente poblada y con infraestructura deficiente de saneamiento. Por lo tanto, a primera vista parece considerable el riesgo de polución de las aguas del Acuífero Patiño.

## 4 La aguas subterráneas en la Zona Piloto

### 4.1 La Zona Piloto

La Zona Piloto - ya indicada en la Figura 1.1 - está ubicada inmediatamente al SE de la capital Asunción. Se trata de la cuenca de los arroyos Mbocayaty y Ñemby, abarcando una extensión aproximada de 45 km<sup>2</sup>. La topografía se caracteriza por ser levemente ondulada (Figura 4.1), con alturas que oscilan entre 100 y 160 m sobre el nivel del mar. Excepción conspicua es el Cerro Ñemby en el sur, cuyos flujos de lava basáltica se elevan por encima de la zona hasta altura de 208 m .

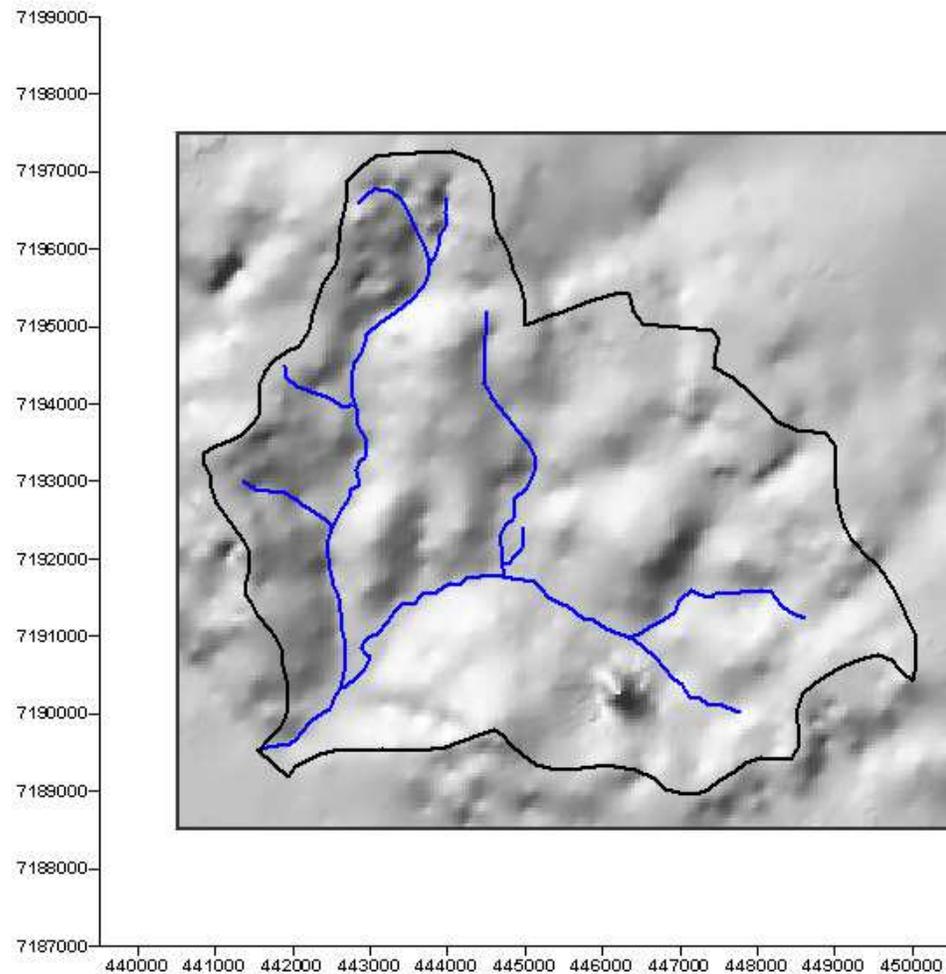


Figura 4.1 La Zona Piloto

Siendo una zona suburbana de la capital Asunción, el área está densamente poblado con una infraestructura correspondiente. En el centro se encuentra la localidad extensa de Ñemby. Hacia el norte se encuentran barrios periféricos de los municipios de Fernando de la Mora y San Lorenzo. En el sur de la zona, el principal centro habitacional es San Antonio, al borde del Río Paraguay. Existen muchos emplazamientos de plantas industriales, como de cemento (Cerro Ñemby), de textiles y de gaseosas (Coca Cola). Las vías de comunicación consisten de tres rutas asfaltadas, un gran número de carreteras empedradas y también muchos caminos de tierra. Las vías asfaltadas son la autopista de doble vía de Asunción a Ñemby, y continuando hacia el Sur a Ypane y Villeta, y las carreteras de San Lorenzo a Ñemby y de Fernando de la Mora a San Antonio, pasando por Villa Elisa.

## **4.2 El sistema acuífero**

### **4.2.1 Constitución hidrogeológica y geometría**

Lo descrito en el anterior capítulo con respecto a la geología es aplicable también a la Zona Piloto. El estudio geofísico (Van Overmeeren, 2000), el pozo exploratorio (Molano, 2001b) y la perforación de 10 pozos piezométricos (Molano, 2001d), en cierta medida, han podido detallar el conocimiento de la matriz geológica en el área. En primer lugar, la forma de las curvas de campo de los sondeos eléctricos ha permitido subdividir el área en diferentes zonas, como lo demuestra la Figura 4.2. En la interpretación, cada zona corresponde con una constitución hidrogeológica distinta. En una zona extensa en el oeste y sur, los sondeos indican la presencia de una capa de baja resistividad eléctrica en la base del acuífero, la cual puede corresponder con arcillas y/o con aguas salobres o saladas. Al norte de esta zona, sin embargo, no se observa esta base de baja resistividad y es probable que toda la secuencia del Acuífero Patiño está llenada de agua dulce, y sin arcillas apreciables en su parte basal. Fue posible también delinear zonas donde intrusiones de rocas ígneas han penetrado las areniscas del Grupo Asunción y ubicaciones asociadas donde se asuman arcillas producidas por la meteorización de roca ígnea o diques o filones metalíferos. La interpretación cuantitativa está sujeta al principio de equivalencia, es decir que diferentes combinaciones de espesor y resistividad eléctrica de capas pueden resultar en una misma curva sintética de la resistividad aparente. Información geológica local – como por ejemplo la adquirida mediante pozos exploratorios – es necesaria para hacer interpretaciones confiables. La Figura 4.3 muestra un corte vertical de rumbo SW – NE pasando por el centro de la zona. La interpretación cualitativa de los sondeos se considera relativamente confiable, pero por razones ya expuestas hay bastante incertidumbre con respecto a los espesores de las capas (referirse a Van Overmeeren (2000) para mayores detalles).

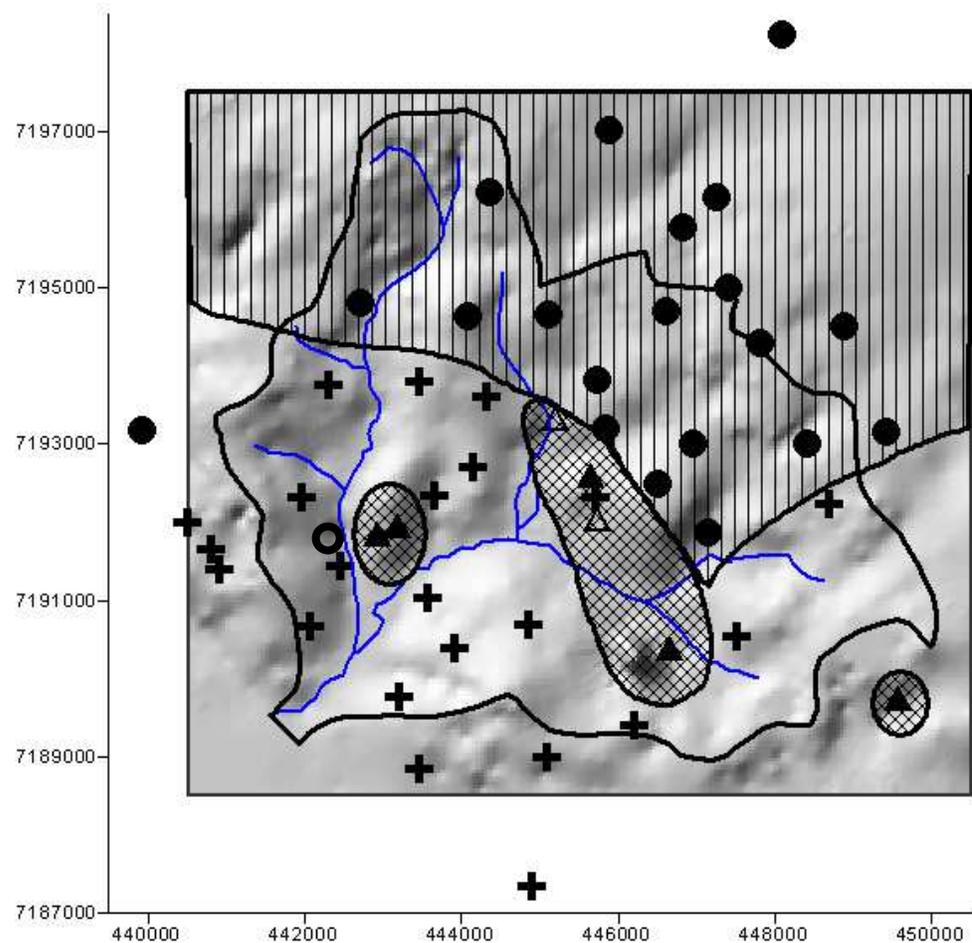


Figura 4.2 Mapa de la distribución de los cuatro grupos de sondeos geoelectricos, representando la constitución (hidro-)geológica.

*Círculos cerrados: acuífero sin base de baja resistividad; cruces: acuífero con base de baja resistividad; triángulos cerrados: intrusiones de roca ígnea; triángulos abiertos: arcillas producidas por meteorización de roca ígnea o diques o filones metalíferos, círculo abierto: pozo exploratorio.*

Uno de los objetivos principales del pozo exploratorio (Molano, 2001b) fue la adquisición de información directa con la cual la interpretación de los sondeos puede ser correlacionada. El sitio para el pozo fue determinado dentro de la zona con baja resistividad en la base del acuífero, de tal manera que fue considerado probable llegar en la capa de baja resistividad dentro de los 300 metros previstos. Con atraso se ha podido perforar y terminar el pozo a poco tiempo antes de finalizar el proyecto FEHS.

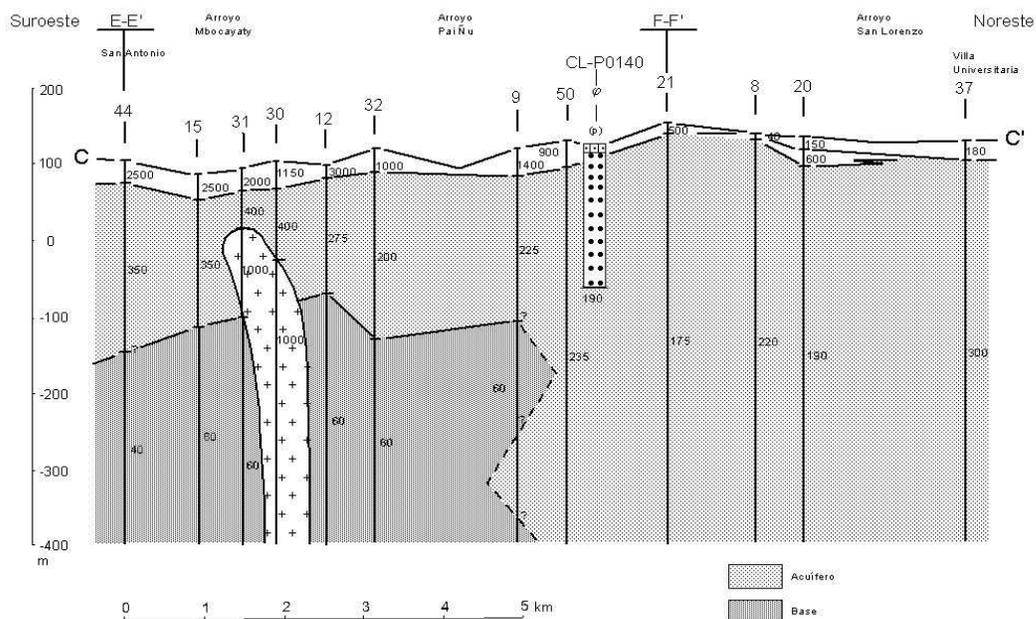


Figura 4.3 Corte geo-eléctrico de rumbo SW – NE por la Zona Piloto

La perforación ha conformado locamente un espesor de más de 300 m de formación de areniscas. Con cierta reserva - debido a fallas instrumentales del equipo de perfilaje - se ha podido concluir también que el pozo todavía no ha llegado a una zona de arcillas y/o a aguas saladas, la cuales por lo tanto debe hallarse a mayor profundidad (Molano, 2001b). La perforación de los diez piezómetros – 32 a 65 m de profundidad - reveló la frecuente presencia de arena arcillosa en los primeros metros bajo suelo, y luego la predominancia de areniscas finas a medias en su perfiles (Molano, 2001d).

#### 4.2.2 Propiedades hidráulicas

Para el reconocimiento de las propiedades hidráulicas del acuífero se ejecutaron algunos ensayos de bombeo y se efectuaron simulaciones exploratorias con un modelo numérico preliminar del flujo subterráneo (Molano, 2001c). Las transmisividades estimadas varían de 30 a 200 m<sup>2</sup>/día para el espesor del acuífero efectivamente explotado por los pozos de bombeo, o sea que la conductividad hidráulica media varía

de 0.5 a 4 m/día. Los ensayos indican que el acuífero no es homogéneo: en varias zonas tiene comportamiento de un sistema multicapa, aunque con baja resistividad hidráulica de los acuitardos, de modo que a escala regional y para tiempos largos el comportamiento hidráulico es de un sistema acuífero libre.

### **4.2.3 Límites laterales**

La Zona Piloto es una cuenca hidrológica, entonces sus límites laterales son divisorias de aguas superficiales. No coinciden con los límites de extensión del Acuífero Patiño, puesto que el mismo es continuo de Asunción a Paraguarí (véase la Figura 1.1). Sin embargo, los arroyos en la zona tienen mucha influencia en el régimen hídrico subterráneo, como será demostrado en la sección 4.3. Resulta que los límites laterales de la Zona Piloto en general no divergen mucho de las divisorias dinámicas subterráneas, entonces es insignificante el flujo subterráneo que pasa por los límites del área, excepto al lado norte. El límite norte de la Zona Piloto se encuentra a unos 1 a 2 km al sur de la divisoria dinámica de las aguas subterráneas, entonces entran flujos subterráneos por este límite.

En el extremo suroeste, la Zona Piloto está bordeada por el río Paraguay con sus depósitos aluviales, por el cual los niveles mínimos del nivel piezométrico en el Acuífero Patiño están condicionados.

## **4.3 Régimen hídrico subterráneo**

### **4.3.1 Niveles estáticos**

Los datos obtenidos en el inventario de los pozos y manantiales (Molano (2001a)) indican que la profundidad al nivel estático del agua subterránea varía de casi cero a más de 45 metros. Profundidades someras ocurren especialmente en las vecindades de ciertos tramos de los arroyos donde el agua subterránea alimenta sus flujos bases. Un mapa del nivel estático en msnm, determinado en base a estos datos e información topográfica, se presenta en la Figura 4.4. Se puede observar que los niveles corresponden en forma general con los patrones de flujo esperados, desde las zonas morfológicas altas hacia los sistemas de drenaje de la cuenca a través de los cauces superficiales.

Faltan datos suficientes para estudiar las variaciones del nivel estático en el tiempo. Por este motivo el proyecto FEHS ha construido una red piezométrica de 10 pozos, en los cuales recientemente se ha iniciado el monitoreo (Molano, 2001d).

### 4.3.2 Extracción y otras formas de descarga

Los datos del inventario de pozos y manantiales han permitido estimar la extracción del agua subterránea. Se estima que esta forma de descarga es actualmente alrededor de 13.5 millones de metros cúbicos por año, equivalente a una lámina de 278 mm/año (Molano, 2001a). Es evidente la descarga natural hacia los arroyos, donde se transforma en flujo base, y en los humedales donde se evapora. Mediciones esporádicas del flujo de estiaje en el arroyo Guazú, en la salida de la cuenca, revelaron caudales de 0.25 a 0.6 m<sup>3</sup>/s.

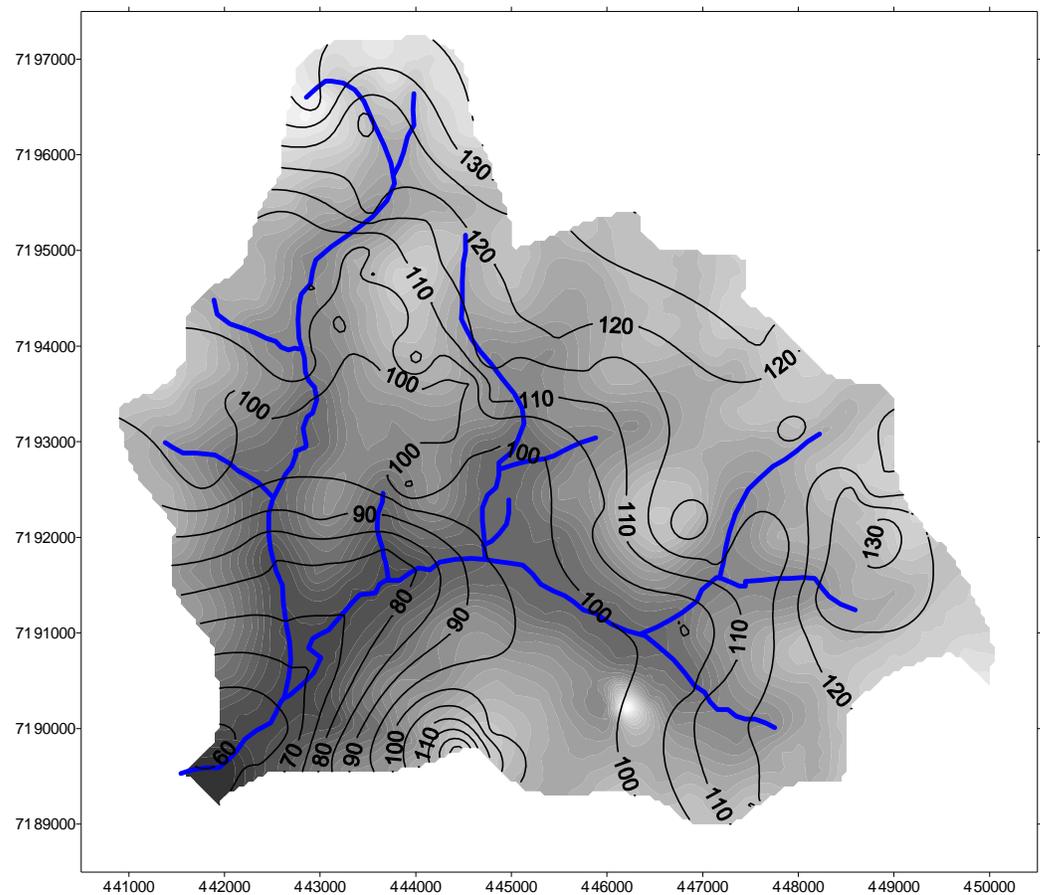


Figura 4.4 Nivel estático del agua subterránea, en msnm.

### 4.3.3 La recarga de las aguas subterráneas

La recarga de las aguas subterráneas es por infiltración y percolación del excedente de las lluvias, y por infiltración y percolación de las aguas servidas. Observando las

condiciones hidrogeológicas no se ha obtenido indicaciones de que haya descensos regionales de los niveles piezométricos, entonces se asume que existe a largo plazo equilibrio dinámico entre recarga y descarga del agua. Consecuentemente se estima que la recarga total (natural + inducida/artificial) es del orden de 500 mm/año. Es orden de magnitud superior a la tasa de la recarga natural de 1-2% de la precipitación pluvial asumida anteriormente (Naciones Unidas, 1985).

#### 4.3.4 Balance hídrico tentativo de las aguas subterráneas

Un balance hídrico anual tentativo de las aguas subterráneas en la Zona Piloto, desarrollado por Molano (2001f), es reproducido en la Figura 4.5. Es muy simplificado, por ejemplo desprecia la entrada de flujos subterráneas por el límite norte y la descarga de agua subterránea por evapotranspiración en los humedales. La “infiltración” en la figura corresponde a lo que en el presente informe se llama “recarga”; incluye tanto la recarga natural como la recarga por flujo de retorno y otros mecanismos no naturales. Pese al carácter tentativo y poco detallado del balance, no hay duda de que es correcto el orden de magnitud de la recarga y la descarga.

### BALANCE HIDRICO SUBSUPERFICIAL ANUAL (preliminar)

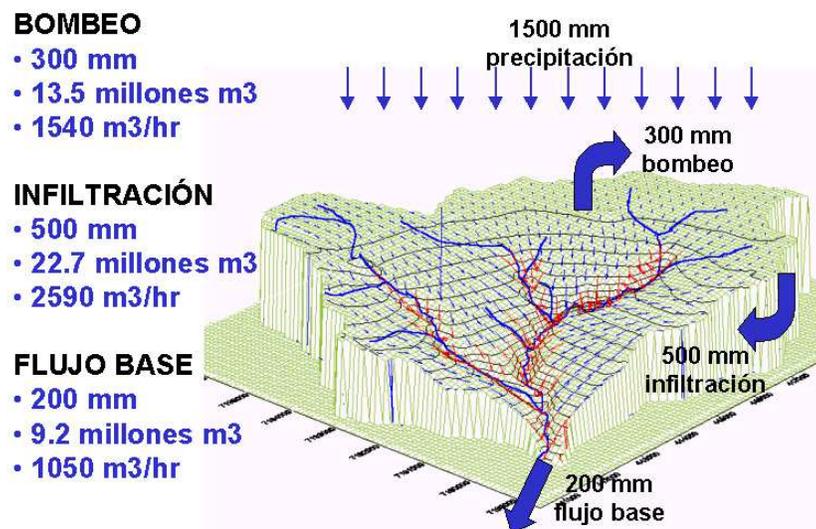


Figura 4.5 Balance hídrico subterráneo anual

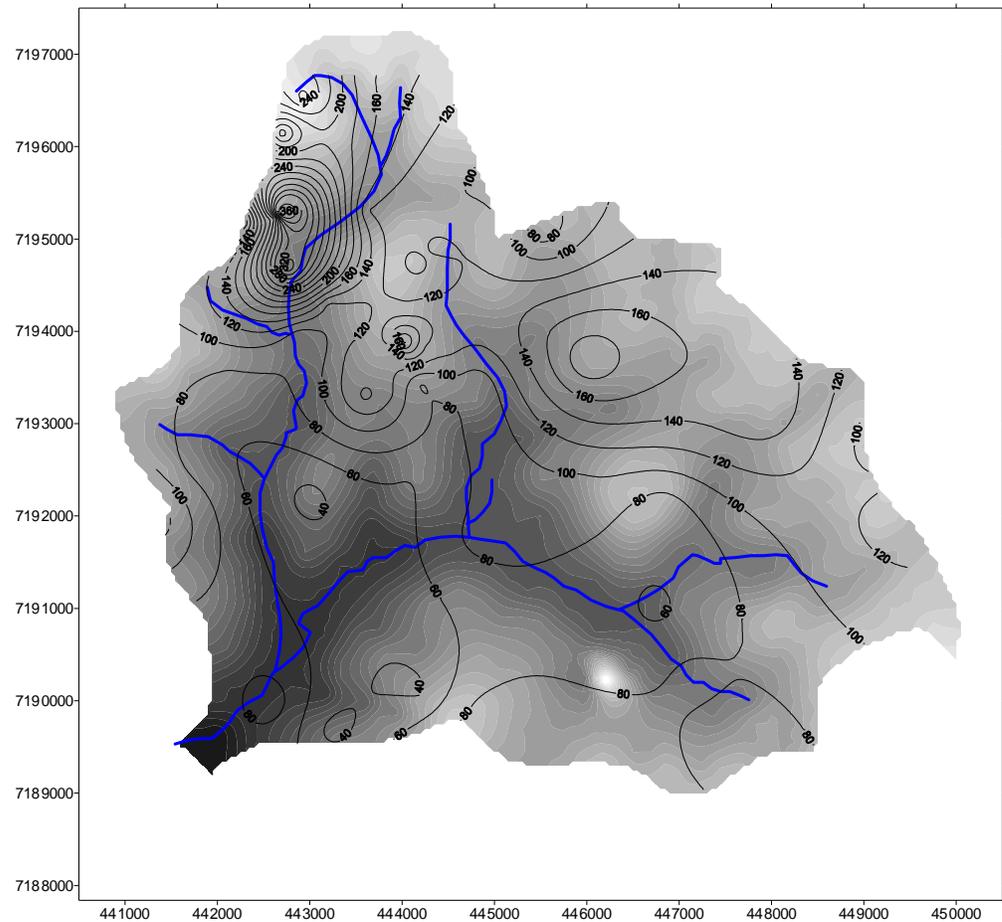


Figura 4.6 Conductividad eléctrica de las aguas en pozos profundos (en  $\mu\text{mho/cm}$ )

## 4.4 Calidad de las aguas subterráneas

### 4.4.1 Variación de parámetros principales

La Figura 4.6 muestra la variación de la conductividad eléctrica del agua basada en los pozos profundos del inventario de pozos (Molano, 2001a), es decir con eliminación de pozos excavados, dado que algunos de ellos están abandonados sin ningún tipo de protección, expuestos a la contaminación superficial.

La conductividad eléctrica - y consecuentemente el contenido de sólidos disueltos - es generalmente muy baja a baja, con excepción de una zona en el noroeste, cercano al Arroyo Mbocayaty, en donde se presentan valores cercanos a los 400 micromho/cm.

Seguramente el origen de esta conductividad alta sea contaminación a partir de la superficie del terreno. Llama la atención que la conductividad eléctrica en las zonas de descarga natural es más baja que en las zonas de descarga, tendencia contraria a la usual. Podría indicar el aumento de la polución difusa en años o decenios recientes. Las aguas muestrados por FEHS muestran tipos bicarbonatados y clorurados de agua, pero en mayoría son tipos mezclas sin anion predominante. Gran porcentaje de los pozos tienen agua contaminada por coliformes.

#### 4.4.2 Aptitud para uso de agua potable

Comparando con las normas Paraguayas para agua potable, las aguas subterráneas en la Zona Piloto tienen tendencia a tener algunas concentraciones en exceso. Entre los parámetros determinados son principalmente la frecuente presencia de bacterias

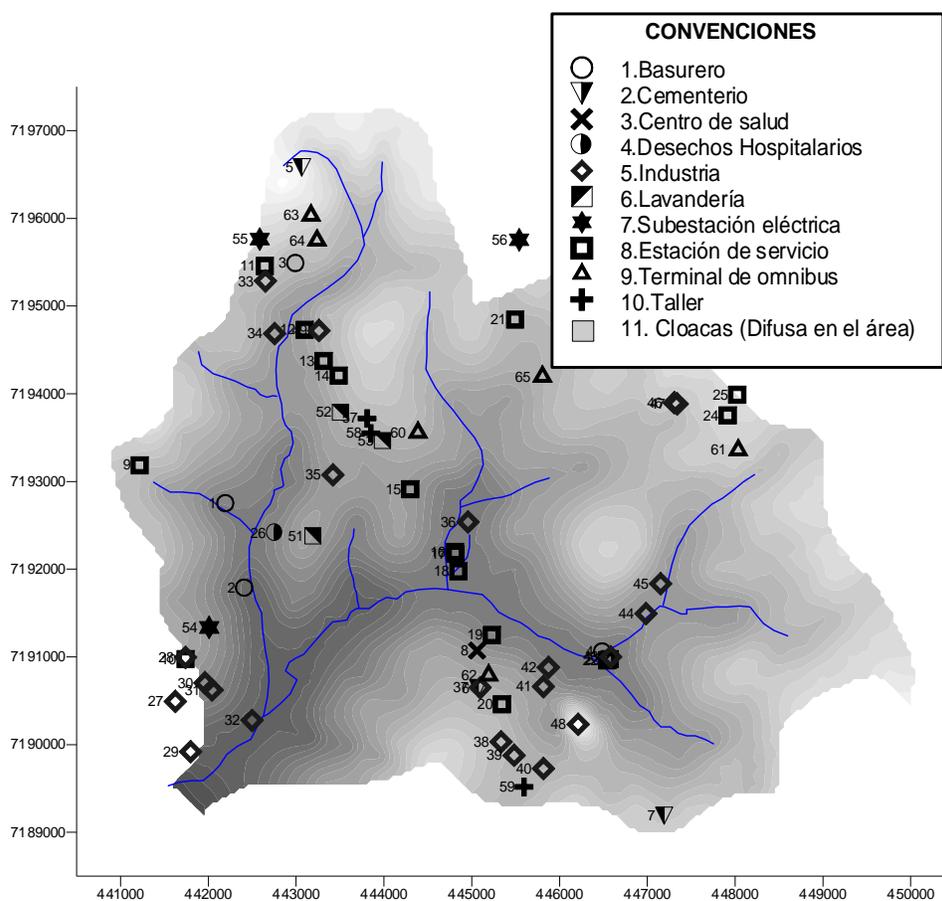


Figura 4.7 Fuentes potenciales de contaminación puntual

coliformes y el alto contenido de hierro, por lo cual el tratamiento de las aguas es necesario. Algunos pozos excavados acusan contaminación severa.

#### 4.4.3 Riesgos de polución

El inventario de fuentes potenciales de contaminación (Molano, 2001e) ha revelado la existencia de fuentes potenciales de polución difusa debido a las aguas servidas de residentes de la zona, además de gran número de fuentes polución puntual como lo demuestra la Figura 4.7

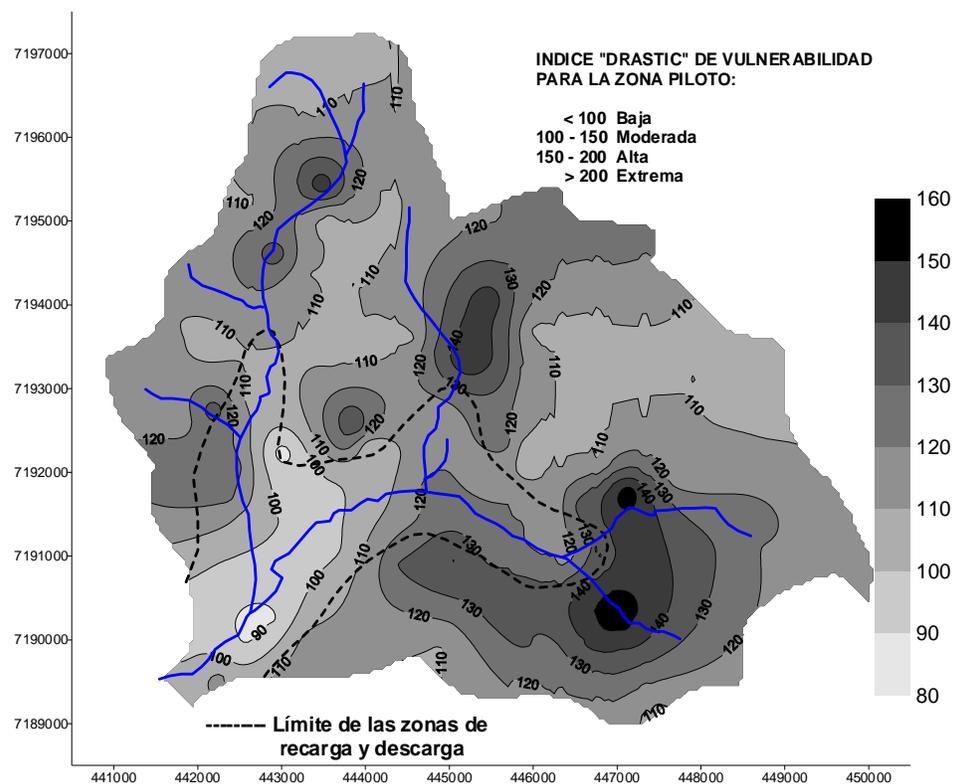


Figura 4.8 Mapa de vulnerabilidad "DRASTIC"

El riesgo de polución no solamente depende de la presencia de fuentes de contaminación potenciales, sino también de la vulnerabilidad del sistema acuífero. Un mapa de vulnerabilidad en base al método DRASTIC fue confeccionado (Molano, 2001e) y se presenta en la Figura 4.8.

Los mapas finalmente fueron combinados por Molano (2001e) en un mapa del riesgo de polución (Figura 4.9). Como se puede observar, en este mapa es dominante la influencia de las fuentes de polución potenciales.

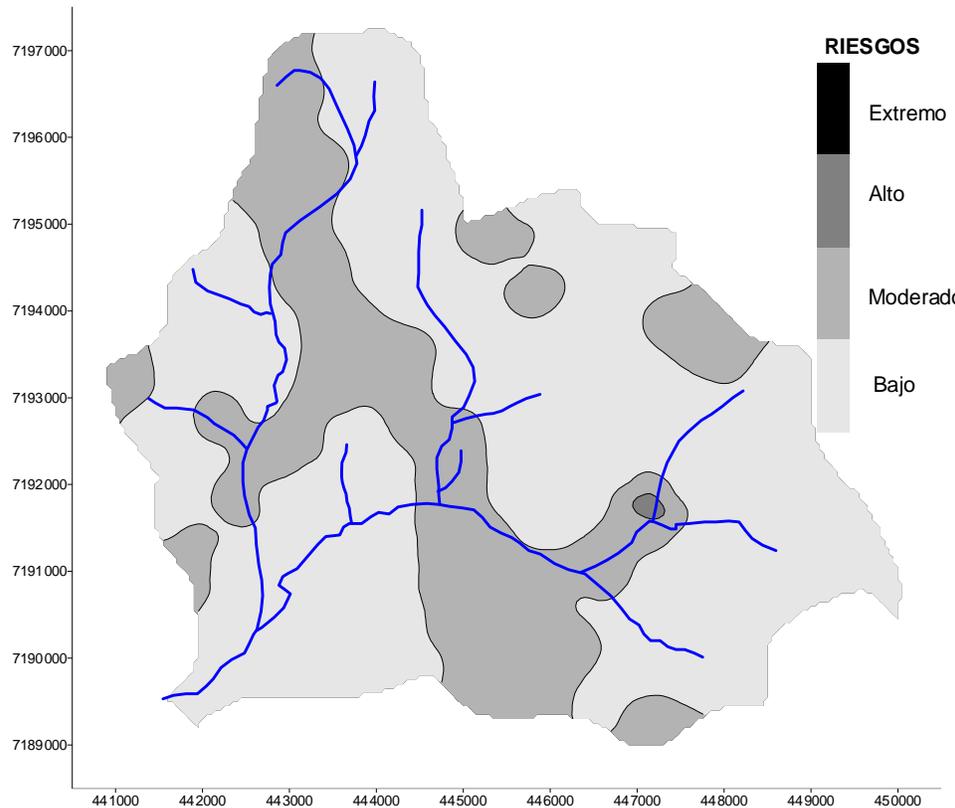


Figura 4.9 Mapa tentativo del riesgo de polución

#### 4.5 Extrapolación a otras partes del Acuífero Patiño

Parte de las observaciones, evaluaciones y conclusiones del estudio de la Zona Piloto no solamente tiene validez para la misma zona, sino puede ser extrapolada a otras partes del Acuífero Patiño, por lo menos en forma de hipótesis. A continuación una pequeña lista:

- (1) Se ha demostrado que el espesor del Acuífero Patiño puede ser en exceso de los 300 metros.

- (2) Es probable que la zona con baja resistividad eléctrica en la base del acuífero encontrada en la parte sur/suroeste de la Zona Piloto forma parte de una franja más o menos continua a lo largo del río Paraguay donde se observan aguas subterráneas saladas o salobres.
- (3) Debido a la permeabilidad moderada del material acuífero y a la morfología del terreno, el régimen de las aguas subterráneas está estrechamente vinculado con el régimen hidrológico superficial. Por lo tanto, los límites de cuencas hidrológicas en general no divergen mucho de las divisorias dinámicas de las aguas subterráneas.
- (4) Es obvio que el análisis a escala sub-regional (Zona Piloto) revela detalles que no figuran en el análisis más global a una escala regional (Acuífero Patiño).
- (5) El riesgo de polución estimado para la Zona Piloto es indicativo para otras zonas del Acuífero Patiño, es decir que el riesgo de polución es obvio, regionalmente.
- (6) Las estimaciones de la recarga y descarga del agua subterránea en la Zona Piloto muestran que las estimaciones anteriores de la recarga del Acuífero Patiño – con tasa de 1 a 2 % de la precipitación – son demasiado bajas.

## **5 Implicaciones para la explotación racional y la protección de las aguas subterráneas**

### **5.1 La planificación racional de nuevos pozos de explotación**

La información recolectada en el presente estudio, su presentación en forma de mapas y su disponibilidad en el Banco de Datos para cualquier otro análisis permiten la planificación racional y óptima de nuevos pozos de agua. Con toda la información disponible evaluada en su contexto geográfico, es posible ubicar las zonas acuíferas más prometedoras horizontal- y verticalmente, estimar la productividad probable de nuevos pozos a perforar y la calidad de sus aguas, identificar posibles riesgos de interacción con pozos vecinos, y especialmente evaluar el riesgo de polución por fuentes de contaminación potenciales en las cercanías. Esta información permite ajustes que aumentarán la efectividad de los pozos y/o disminuirán el costo del agua.

### **5.2 Diagnóstico con relación al control y a la protección de las aguas subterráneas**

Es imperativo que un acuífero de gran importancia socio-económica como el Acuífero Patiño sea debidamente controlado y protegido para asegurar que siga siendo una fuente sostenible de abastecimiento de agua, y que su explotación no cause degradación ambiental inaceptable. Con respecto a este tema, se diagnostican tres riesgos principales para el Acuífero Patiño:

#### *(1) Riesgo de salinización en la zona bordeando el río Paraguay*

La presencia de aguas saladas en el Acuífero Patiño cerca al Río Paraguay, posiblemente en una franja más o menos continua, no solamente limita las posibilidades de explotar localmente las aguas subterráneas someras de buena calidad, sino también es una amenaza para zonas vecinas que exclusivamente contienen agua dulce. Existe el peligro que las aguas saladas invadan zonas todavía buenas, con el efecto de la degradación paulatina de partes del Acuífero Patiño. Antes de poder combatir y controlar efectivamente la posible invasión, hay que delinear con cierta precisión la zona salada y hay que conocer el origen del agua y los mecanismos de su posible migración. Esto requiere la ejecución de sondeos y/o calicatas eléctricas, perforaciones exploratorias, cables de electrodos, análisis químico e isotópico de las aguas y modelos de simulación. Amplios conocimientos de la geología e hidráulica son necesarias para la interpretación correcta. Una vez determinados la extensión de la zona afectada y los mecanismos hidráulicos involucrados, se pueden desarrollar ideas con respecto a medidas para el control efectivo de la salinización.

*(2) Riesgo de polución por presencia y actividades humanas*

El estudio realizado indica que la polución por presencia y actividades humanas representa un gran riesgo para la calidad del agua. Desde luego pone al riesgo su uso sostenible para el abastecimiento de agua potable sin costo excesivo de tratamiento. La vulnerabilidad es en general apreciable y ya se identificaron varias sustancias contaminantes en las aguas de muchos pozos. Es posible que muchas otras sustancias nocivas presentes en el área han contaminado las aguas también (o lo harán en el futuro), pero los análisis de laboratorio realizados hasta la fecha no las detectaron por no ser incluidas en el programa de análisis. Esencial para el reconocimiento del riesgo de polución es el inventario y el estudio detallado de las fuentes potenciales de contaminación en toda la zona del Acuífero Patiño, en combinación con el mapeo de la vulnerabilidad y el análisis químico de muestras en lugares sospechosos de polución. El programa del análisis químico tiene que adaptarse a las sustancias contaminantes esperadas, por ejemplo metales pesados, hidrocarburos, pesticidas, etc. Los resultados de las investigaciones resultarán en la formulación de medidas efectivas para proteger el agua subterránea.

*(3) Riesgo de sobre-explotación*

En zonas acuíferas donde hay gran densidad de población y actividad económica con demandas de agua (por ejemplo, industrias), la intensidad de la explotación del agua subterránea suele incrementarse progresivamente. En consecuencia cambia el balance hídrico subterráneo, de modo que el incremento de la extracción es compensado por la reducción de descargas naturales y/o la disminución del agua almacenada. La reducción de descargas naturales puede afectar los caudales mínimos de los arroyos – con deterioros de la calidad del agua por la menor dilución - y secar humedales y otros ecosistemas húmedos. La disminución del agua subterránea almacenada es asociada con descensos de los niveles estáticos del agua subterráneas, causando el aumento del costo del agua bombeado, secando pozos con profundidad limitada y eventualmente agotando los recursos explotables.

No hay indicaciones ya de una sobre-explotación regional del Acuífero Patiño, aunque a nivel local pueden presentarse descensos de nivel e interferencias entre pozos. Sin embargo, el acuífero potencialmente es susceptible a sobre-explotación. Por consiguiente, es necesario mantenerse alerta, monitorear las variaciones del nivel piezométrico en lugares estratégicos e interpretar los datos de monitoreo en combinación con las variaciones climáticas, hidrológicas y del bombeo. En casos de tendencias no deseadas hay que desarrollar e implementar medidas que limiten el bombeo.

Es evidente que el control y la protección de las aguas subterráneas requieren la intervención mediante medidas prácticas, efectivas e implementables. Para la parte operativa es necesario que exista una institución con el mandato y la capacidad de

implementar las medidas, que se tenga una normativa basada en legislación vigente, y que los habitantes de la zona entiendan la necesidad de las medidas, las acepten y cooperen en su implementación.

### **5.3 La Zona Piloto como zona experimental**

Son muy complejos los procesos de cambio y ajuste en las aguas subterráneas bajo la influencia por un lado de actividades incontroladas de extracción de agua y polución, y por otro lado de medidas de control y protección. Requieren observación muy intensiva y minuciosa para sacar conclusiones correctas acerca de las tendencias y del impacto de medidas. Conviene seleccionar la Zona Piloto para ganar experiencia al respecto y para observar al mismo tiempo tendencias y cambios que pueden ser indicativos para otras partes del Acuífero Patiño. Por su extensión limitada y su cercanía a la oficina del SENASA ofrece condiciones prácticas muy favorables y además es lógico que se aprovechen los conocimientos ya acumulados, aumentándose con información de la variabilidad temporal que en la corta duración del proyecto FEHS no se han podido coleccionar.

## **6 Conclusiones**

### **6.1 Con respecto al estudio llevado a cabo**

El Estudio del Acuífero Patiño llevado a cabo dentro del Proyecto “Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA” (FEHS) ha proporcionado información significativa y valiosa, basada en buena parte en nuevos datos de campo.

Aunque la mayor parte de los esfuerzos fue concentrado en la Zona Piloto, se desempeñaron también actividades relacionadas al Acuífero Patiño en su totalidad. Además resultó que mediante el estudio de la Zona Piloto se ganaron conocimientos que permitieron un mejor entendimiento de otras partes del Acuífero Patiño.

Dentro de la Zona Piloto se obtuvieron mejores conocimientos de la constitución hidrogeológica, la geohidráulica, los niveles del agua, el balance hídrico subterráneo, la calidad del agua, la vulnerabilidad del acuífero, las fuentes de contaminación potenciales, etc.

Entre los resultados de las investigaciones en la Zona Piloto destacan: (1) la identificación de una zona cerca al Río Paraguay con capa profunda de baja resistividad eléctrica, posiblemente relacionada a aguas saladas profundas; (2) la cuantificación del balance hídrico subterráneo, indicando tasa de recarga mucho mayor que la asumida en estudios anteriores del Acuífero Patiño; (3) la determinación tentativa del riesgo de polución, que constituye amenaza apreciable para el uso de las aguas para fines potables.

Para todo el territorio del Acuífero Patiño se ha obtenido un imagen regional consistente del nivel piezométrico y de los parámetros principales de la calidad del agua. Con excepción de una franja a lo largo del Río Paraguay, el agua es en general de bajo grado de mineralización. Sin embargo, mayor parte de los pozos muestreados no cumple con las normas de potabilidad, especialmente debido a la contaminación bacteriológica y el alto contenido de hierro.

### **6.2 Con respecto a la explotación racional y la protección de las aguas subterráneas del Acuífero Patiño**

La información obtenida es valiosa para la planificación racional de nuevos pozos de agua, ahorrándose recursos y evitándose problemas.

Las principales amenazas identificadas con respecto a la sostenibilidad del uso de las aguas subterráneas dulces son: (1) la presencia y el riesgo de invasión de aguas saladas en una franja a lo largo del Río Paraguay, y (2) el riesgo de contaminación en toda la zona del Acuífero Patiño. El riesgo de la sobre-explotación requiere vigilancia mediante monitoreo, pero en forma regional todavía no parece agudo.

### **6.3 Con respecto a dudas y falta de información**

Aunque con las contribuciones del presente estudio los conocimientos del Acuífero Patiño son significativos y diversos, es claro también que falta todavía información y el análisis más profundo para eliminar dudas existentes, verificar problemas diagnosticados e investigar posibles soluciones.

Dudas importantes incluyen la extensión y profundidad de la franja de aguas saladas que localmente se ha observado a lo largo del Río Paraguay. Particularmente, no ha sido confirmado si se extiende en la Zona Piloto, o no. Tampoco es claro el origen de las aguas saladas y los mecanismos y condiciones de su posible migración.

Con respecto a la posible contaminación de las aguas subterráneas todavía se tiene información incompleta. Especialmente faltan datos con respecto a sustancias contaminantes que no forman parte de análisis rutinarios de aguas potables. Además no existe un inventario completo de las fuentes de contaminación ni de la vulnerabilidad del agua subterránea en toda la zona del Acuífero Patiño.

Faltan en general datos con respecto a la variabilidad en el tiempo de los componentes del balance hídrico.

## **7 Recomendaciones**

### **7.1 Con relación a la planificación racional de nuevos pozos para la extracción de agua subterránea**

Se recomienda el uso intensivo de la información del presente estudio y de otros datos almacenados en el Banco de Datos para la planificación racional y óptima de nuevos pozos de agua.

### **7.2 Con relación al riesgo de la salinización**

Se recomienda continuar explorando y mapeando toda la zona a lo largo del Río Paraguay donde se encuentran aguas subterráneas saladas o salobres. Esto requiere la en primer lugar ejecución de sondeos y/o calicatas eléctricas y perforaciones exploratorias, en combinación con mediciones de la conductividad eléctrica de las aguas.

Se recomienda estudiar el origen de las aguas saladas en dicha franja. Para tal efecto se necesitan los resultados de la recomendación anterior, además el análisis químico e isotópico de muestras de las aguas y simulaciones con modelos numéricos. Amplios conocimientos de la geología e hidráulica son necesarios para la interpretación correcta.

Se recomienda monitorear la variabilidad de los límites de la zona de las aguas saladas, preferiblemente con cables verticales enterrados de electrodos y con el monitoreo de la conductividad eléctrica de las aguas.

Se recomienda desarrollar e implementar medidas de control, una vez que se conocen la extensión de la franja de las aguas saladas y los mecanismos de su posible movimiento.

### **7.3 Con relación al riesgo de polución**

Se recomienda un inventario completo de las fuentes de contaminación potenciales en toda la zona del Acuífero Patiño. No solamente hay que clasificar las fuentes, sino también especificar las sustancias contaminantes, su carga anual, su modo de descarga y su posible tratamiento en el lugar donde se produce.

Se recomienda el mapeo de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en toda la zona.

Se recomienda el análisis detallado de muestras de agua en zona sospechosas con respecto a la polución. El programa del análisis químico tiene que adaptarse a las sustancias contaminantes esperadas, por ejemplo metales pesados, hidrocarburos, pesticidas, etc.

Se recomienda formular e implementar medidas efectivas para proteger el agua subterránea contra la polución, en base a los resultados de los estudios efectuados.

#### **7.4 Con relación al riesgo de la sobre-explotación**

Se recomienda iniciar un programa de monitoreo de los niveles del agua subterránea en toda la zona del Acuífero Patiño. Si es necesario hay que construir pozos especiales de monitoreo, como se hizo en la Zona Piloto.

Se recomienda además instalar y operar una red de pluviómetros dispersos en la zona y algunas estaciones de aforo en las partes bajas de arroyos que tienen caudales significantes de flujo base alimentado por el Acuífero Patiño.

#### **7.5 Con relación a la Zona Piloto**

Se recomienda continuar trabajando en la Zona Piloto y adoptarla como zona experimental para observar cambios en las aguas subterráneas y su relación con acciones no controladas y con medidas implementadas.

Se recomienda limpiar el pozo de exploración del proyecto FEHS y hacer analizar en el laboratorio una muestra de agua cuando sea claro que sea representativa para el acuífero inferior, en la profundidad del filtro.

Se recomienda seguir monitoreando los niveles del agua en los pozos piezométricos construidos por el proyecto FEHS, con la frecuencia de dos mediciones por mes en los pozos con monitoreo manual y con alta frecuencia (por ejemplo, una medición por hora) en el pozo que cuenta con los equipos "Diver".

Se recomienda instalar y operar algunos pluviómetros dispersos y una estación permanente de aforo en la salida del arroyo Guazú.

Se recomienda detallar la información de las fuentes de polución identificadas.

Se recomienda preparar informes semi-anales con los datos procesados de la Zona Piloto y sacar diagnósticos en base a los datos observados.

## 8 Referencias

- Bartel, Wilmar & Rolf Muff, 1995. Observaciones geológicas de Paraguay Central en relación al agua subterránea. 2° Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos en el Paraguay, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.
- Carvalho, Félix, Félix Villar, Humberto Villalba y Antonio Montanholi, 1995. Contribución al conocimiento hidrogeológico del área de Guarambaré". 2° Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos en el Paraguay, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.
- Gomez, Dario. 1991. Consideraciones morfoestructurales y estratigráficas de la antiformal de Asunción y su relación con la exploración de aguas subterráneas. 1er. Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos en el Paraguay. Casa de la Cultura, Asunción. Paraguay.
- Molano, Carlos E., 2001a. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.3: Inventario de pozos y manantiales en la Zona Piloto. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Molano, Carlos E., 2001b. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.5: Pozo exploratorio. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Molano, Carlos E., 2001c. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.6: Condiciones Geohidráulicas en la Zona Piloto. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Molano, Carlos E., 2001d. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.7: Monitoreo piezométrico en la Zona Piloto. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Molano, Carlos E., 2001e. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.8: Riesgo de contaminación en la Zona Piloto. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Molano, Carlos E., 2001f. Las aguas subterráneas en la Zona Piloto. Taller de presentación de los resultados del Proyecto FEHS, SENASA-TNO, Asunción, 6 de marzo del 2001.
- Naciones Unidas, 1986. Memoria del Mapa Hidrogeológico de la República del Paraguay, escala 1: 1 000 000. Proyecto PAR 83/05, Asunción, Paraguay. Gobierno de la República del Paraguay, Comisión Nacional de Desarrollo Integrado del Chaco, y Organización de las Naciones Unidas, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. 106 páginas.
- Ríos Otero, Juan; Martínez Oscar y Carlos Centurión 1995. Contaminación del Agua Subterránea del Gran Asunción. 2° Simposio sobre Aguas Subterráneas y Perforación de Pozos en el Paraguay, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay.

- SENASA, 1999. Departamento Central del Paraguay: Banco de Datos de pozos perforados por SENASA. Publicación no. 2, Departamento de Recursos Hídricos, Dirección de Agua y Saneamiento del SENASA.
- Van der Gun, Jac A.M., 2001a. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.2: Resumen de trabajos y estudios previos. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Van der Gun, Jac A.M., 2001b. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.9: Calidad de las aguas del Acuífero Patiño. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Van Overmeeren, R.A., 2000. Estudio del Acuífero Patiño, Informe Técnico 2.4: Investigación geoelectrica en la Zona Piloto en la Zona Piloto. Informe de TNO, preparado para SENASA, Proyecto FEHS.
- Villar, Félix, Félix Carvallo y Antonio Montanholi, 1996. Riesgos en la explotación del Acuífero Patiño en el área noreste del Departamento Central. SENASA, Departamento de Recursos Hídricos, San Lorenzo, Paraguay.



