

Instituto Holandés de Geociencias Aplicadas TNO
- Servicio Geológico Nacional

Informe de TNO

"Fortalecimiento de los Estudios Hidrogeológicos del SENASA"

Estudio del Acuífero Patino - Informe técnico 2.9
Calidad de las aguas del Acuífero Patiño

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

Este informe presenta los resultados de un estudio regional de la calidad de las aguas subterráneas del Acuífero Patiño, basado en el análisis de muestras tomados por el proyecto FEHS.

En general, las aguas subterráneas del Acuífero Patiño son provenientes de la infiltración reciente de lluvias; por consiguiente, tienen grado bajo de mineralización, excepto en algunos casos de polución puntual. Sin embargo, en una franja de 2 a 8 km de ancho a lo largo del río Paraguay se ha detectado en varios sitios la presencia de agua salada, a partir cierta profundidad variable. Estas aguas saladas de origen antiguo amenazan la calidad del agua dulce que se encuentra encima de las mismas. El origen distinto se refleja en las características hidroquímicas de las aguas, pero solamente hay hipótesis no comprobadas con respecto al origen.

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 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 es más pequeño todavía.

La información obtenida enfatiza la vulnerabilidad del sistema acuífero con respecto a polución.

Considerando la salinización cerca al río Paraguay y la polución antropógena como las amenazas principales para la calidad del agua, se recomienda estudiar ambos fenómenos en mayor detalle y desarrollar medidas para su control adecuado.

Contenido

Resumen	i
Lista de figuras	iii
Lista de tablas	iv
1 Introducción	1
2 Características generales del área	3
2.1 Ubicación y topografía	3
2.2 Condiciones geológicas	3
2.3 Condiciones climatológicas e hidrográficas	3
2.4 Aguas subterráneas	5
3 Muestreo y análisis de laboratorio	7
3.1 La toma de muestras	7
3.2 El análisis de laboratorio	7
3.3 Chequeo de los resultados	8
4 Interpretación de los datos	11
4.1 Los datos obtenidos y sus estadísticas	11
4.2 Variaciones y tendencias dentro de la zona	16
4.3 Potabilidad del agua	18
5 Conclusiones y recomendaciones	30
5.1 Conclusiones	30
5.2 Recomendaciones	30
6 Referencias	32
Apéndices	
A Datos de muestreo y análisis	
B Comparación de laboratorios	

Lista de figuras

Figura 1.1	El Acuífero Patiño y los puntos de muestreo.....	2
Figura 2.1	Mapa piezométrico del Acuífero Patiño (en msnm).....	6
Figura 3.1	Error en el balance iónico de las muestras analizadas	10
Figura 4.1	Variación de la hidroquímica de las muestras de aguas subterráneas dulces en el Acuífero Patiño	11
Figura 4.2	Carácter químico de algunas muestras seleccionadas del Acuífero Patiño.....	14
Figura 4.3	Conductividad eléctrica (microsiemens/cm)	19
Figura 4.4	Sodio como fracción de los cationes totales (meq/l)	20
Figura 4.5	Calcio como fracción de los cationes totales (meq/l)	21
Figura 4.6	Magnesio como fracción de los cationes totales (meq/l).....	22
Figura 4.7	Cloruros como fracción de los aniones totales (meq/l).....	23
Figura 4.8	Bicarbonatos como fracción de los aniones totales (meq/l).....	24
Figura 4.9	Sulfatos como fracción de los aniones totales (meq/l).....	25
Figura 4.10	Tipos químicos de agua en el Acuífero Patiño	26
Figura 4.11	Nitratos (en mg N por litro).....	27
Figura 4.12	Coliformes totales (número de colonias por 100 cc)	28
Figura 4.13	Coliformes fecales (número de colonias por 100 cc).....	29

Lista de tablas

Tabla 3.1	Comparación de indicadores de calidad de los análisis en tres laboratorios	8
Tabla 3.2	Calidad de los datos según algunos criterios de chequeo	9
Tabla 4.1	Resumen de los análisis fisico-químico-bacteriológicos de las muestras del Acuífero Patiño.....	12

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 informe presenta los resultados de una campaña de muestreo y análisis de laboratorio de las aguas subterráneas en toda la zona del Acuífero Patiño, llevada a cabo como una de las actividades del proyecto FEHS. Incluye el listado y la descripción de los datos de análisis obtenidos, juntamente con la evaluación de la potabilidad de las aguas y de las variaciones espaciales de la calidad. Aparte del Acuífero Patiño se sacaron también muestras de aguas superficiales y algunas de aguas subterráneas en sitios del lado chaqueño del río Paraguay, para facilitar la interpretación de los datos. **En total se analizaron en el laboratorio 125 muestras de agua.**

Esta información proporciona el punto de partida para desarrollar ideas con respecto a las prioridades para la protección de la calidad de las aguas del Acuífero Patiño. La Figura 1.1 delimita la zona que en el presente estudio se denomina “Acuífero Patiño” y muestra la ubicación de los puntos de muestreo.

Agradecimientos

El autor agradece al Lic. Félix Carvallo del Departamento de Recursos Hídricos de SENASA por su asistencia en identificar puntos de muestreo relevantes; a los señores Víctor Lezcano, Carlos Paredes, Francisco González y Jorge Insfran para la toma de muestras; a la Sra Porfiria Narvaés, Ing. Gustavo González y el otro personal del laboratorio del SENASA para el análisis; al laboratorio de CORPOSANA en la persona de la Doctora Gladys de Molas por el análisis gratuita de cinco muestras; a Wim van der Linden y Johny Grommeck por su asistencia en la preparación del mapa base del área; y a Carlos Molano por sus consejos valiosos respecto a la aplicación de SURFER.

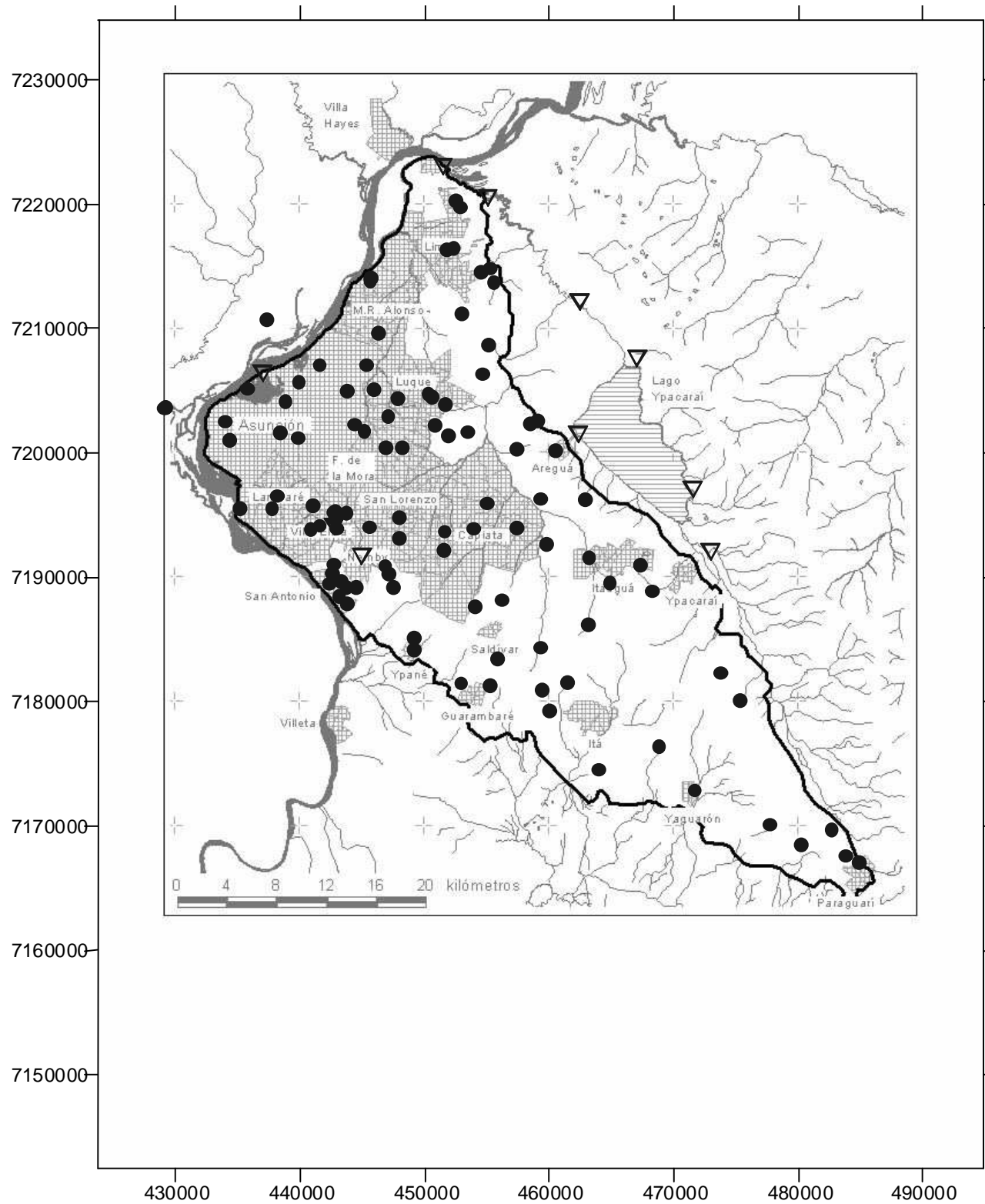


Figura 1.1 El Acuífero Patiño y los puntos de muestreo

2 Características generales del área

2.1 Ubicación y topografía

El denominado Acuífero Patiño (véase Figura 1.1) abarca una zona de 1173 km² 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. 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 alturas de unos 300 metros. El otro - con alturas hasta por encima de 200 metros - 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 las márgenes del río Paraguay.

2.2 Condiciones geológicas

El Acuífero Patiño se encuentra dentro de una fosa tectónica, en la cual durante el Cretácico Media hasta finales del Terciario fueron depositadas las formaciones del Grupo Asunción, encima de rocas silíceas. 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 del 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).

2.3 Condiciones climatológicas e hidrográficas

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.

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 centrifugal 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 km² 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, incluyéndose las urbanizaciones 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 km² 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 Yaguarón. Tiene extensión de 256 km² 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).

2.4 Aguas subterráneas

Las formaciones del Grupo Asunción forman un sistema acuífero denominado “Acuífero Patiño”. Está compuesto predominantemente de areniscas rojizas friables y su comportamiento hidráulico es del tipo acuífero libre de conductividad hidráulica relativamente baja.

El sistema acuífero es recargado principalmente por las lluvias. Parte de la descarga es por flujos subterráneos directamente al río Paraguay, otra parte por la exfiltración del agua a los numerosos arroyos de la zona (flujo base) y por evapotranspiración en zonas donde el nivel de agua se encuentra a profundidad somera. Además, es explotado intensivamente mediante gran cantidad de pozos, que son la fuente de agua potable para gran parte de los dos millones personas que viven en la zona. Parte de las aguas servidas – derivadas tanto de las aguas subterráneas como de aguas superficiales – infiltra en el suelo y forma otra componente de recarga, a menudo contaminada.

La dinámica hidrológica de las aguas subterráneas se refleja en el mapa piezométrico de la Figura 2.1. La morfología piezométrica tiene bastante correlación con la topografía, observándose los niveles piezométricos más elevados en las lomas anteriormente mencionadas. Es bien marcada la influencia del drenaje por el río Paraguay y por los arroyos principales. Por consiguiente, la dirección del flujo subterráneo es centrifugal y corresponde en grandes rasgos a la dirección del flujo superficial.

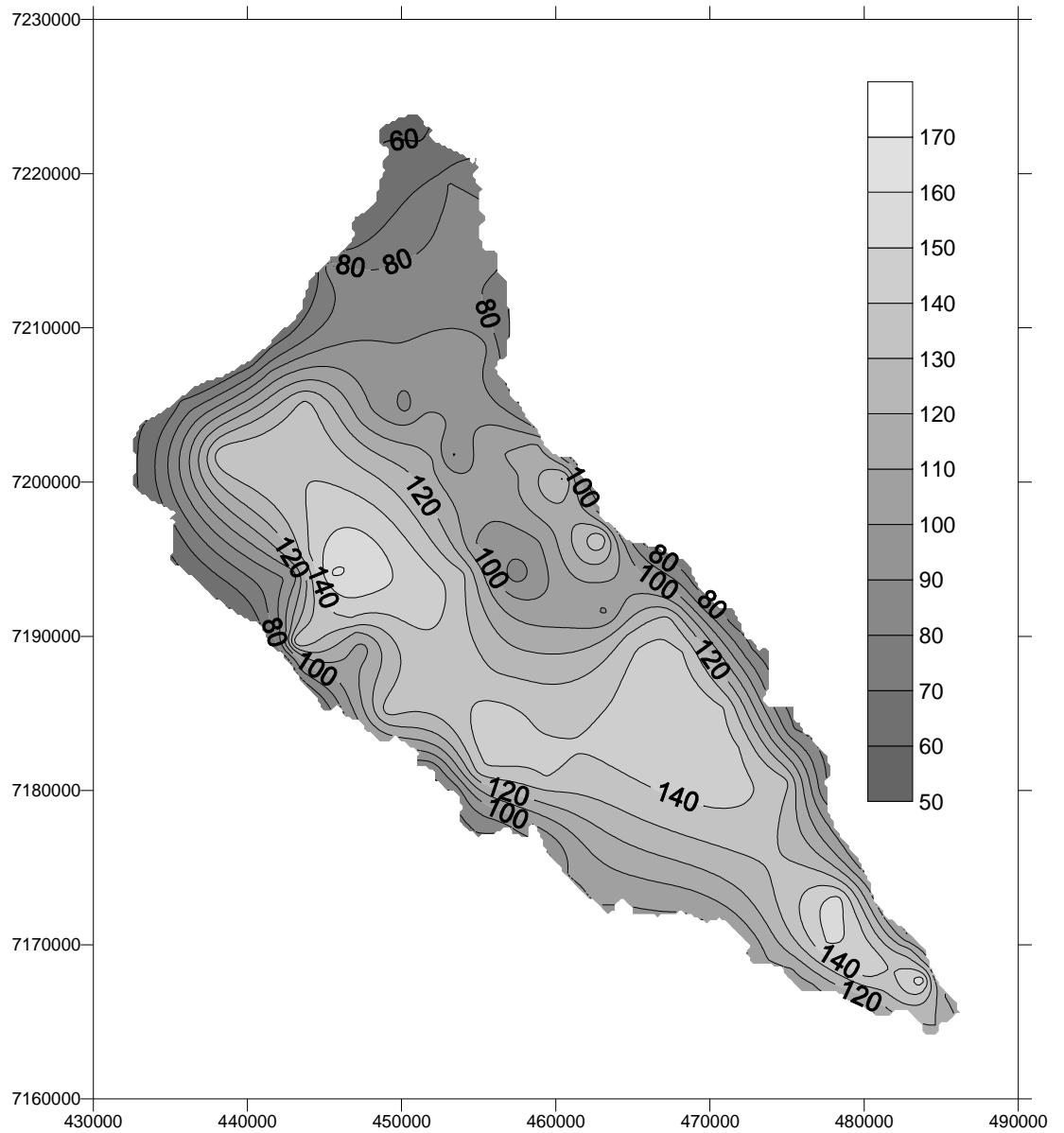


Figura 2.1 Mapa piezométrico del Acuífero Patiño (en msnm)

3 Muestreo y análisis de laboratorio

3.1 La toma de muestras

Para estudiar la calidad de las aguas del Acuífero Patiño se tomaron muestras de más de cien pozos dispersos a lo largo de toda la zona (Figura 1.1). Con miras a la interpretación de los análisis se tomaron además algunas muestras de pozos en la zona colindante del Bajo Chaco y también un número de muestras de aguas superficiales. Considerando que una buena calidad de los análisis requiere que el período entre toma de muestra y análisis de laboratorio no sea más de 48 horas, la capacidad limitada del laboratorio del SENASA fue un factor importante en el ritmo del muestreo. Entre 12 de diciembre del 2000 y 20 de febrero del 2001 se colectaron en 12 días de salida al campo un total de 125 muestras, para su análisis posterior en el laboratorio.

Criterios para la selección fueron la distribución espacial de los puntos de muestreo, la disponibilidad de información con respecto a los pozos muestreados, la presencia de una bomba u otro instrumento para sacar la muestra, y la aprobación de los dueños o usuarios de los pozos. En algunos casos había razones especiales para seleccionar cierto pozo, por ejemplo esperar anticipadamente contaminación.

En ciertas zonas – por ejemplo en la ciudad de Asunción – fue bastante difícil encontrar pozos aptos para el muestreo. Por falta de alternativas se aceptaron en tales zonas para el muestreo también pozos que no cuentan con información adicional (profundidad, nivel estático, etc.).

Las muestras fueron tomadas por un equipo de una persona del Departamento de Recursos Hídricos y un muestreador del laboratorio del SENASA. El último determinó con GPS en el campo las coordenadas UTM y la altura del sitio, además ejecutó los siguientes mediciones: temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno usado y turbidez. Dos botellas esterilizadas (de 1 litro cada uno) fueron llenadas en cada sitio de muestreo. Las muestras se guardaban durante el viaje en una caja térmicamente aislada y refrigerada con hielo y se entregaban el mismo día en el laboratorio.

3.2 El análisis de laboratorio

El laboratorio del SENASA fue seleccionado para ejecutar el análisis de las muestras. El análisis fue uniforme para todas las muestras, incluyendo el análisis físico-químico-bacteriológico completo para agua potable. Resultados preliminares se obtuvieron del laboratorio generalmente entre una y cuatro semanas después de la entrega de las muestras. A inicios de marzo fueron recibidas las versiones finales y chequeadas de los resultados. Los resultados se presentan en el Apéndice A.

3.3 Chequeo de los resultados

Después de recibir los primeros resultados durante la segunda semana de enero del 2001, se llevaron a cabo algunos chequeos lógicos de los resultados, sobre todo determinando el error en el balance iónico. Este error resultó - con un promedio de 19% y un máximo de 53% - mucho más alto que el error anticipado, además hubo en casi todos los casos un exceso de los cationes en comparación con los aniones. Sin embargo, discutiendo el asunto con el personal del laboratorio no se ha podido identificar explicaciones, razón por la cual se decidió analizar cinco muestras en triplicado, en tres laboratorios distintos: el laboratorio del SENASA, el laboratorio del Instituto Nacional de Tecnología y Normalización (INTN) y el laboratorio de CORPOSANA. El análisis comparativo se limitó a los componentes físico-químicos. El Apéndice B presenta los resultados de los análisis comparativos y la Tabla 3.1 muestra los indicadores seleccionados para la comparación. Resulta que el laboratorio de INTN tiene menor error en el balance iónico, sin embargo tiene relación menos satisfactoria entre la dureza calculado en base a Calcio y Magnesio, y la dureza determinada en el laboratorio.

Tabla 3.1 Comparación de indicadores de calidad de los análisis en tres laboratorios

Muestra	Laboratorio	Error balance Iónico (%)	HCO ₃ / Alcal. Total	Dureza calc../ Dureza lab	SDT calc../ CE
1	CORPOSANA	9.3	0.61	1.00	0.61
1	SENASA	17.2	0.61	1.00	0.44
1	INTN	-2.6	0.61	1.27	0.69
2	CORPOSANA	39.9	0.61	1.00	0.64
2	SENASA	12.0	0.61	1.00	0.63
2	INTN	8.5	0.61	0.66	0.78
3	CORPOSANA	25.2	0.61	1.00	0.58
3	SENASA	16.5	0.61	1.00	0.55
3	INTN	-8.0	0.61	0.73	0.76
4	CORPOSANA	22.7	0.61	1.00	0.59
4	SENASA	11.0	0.61	1.00	0.50
4	INTN	8.6	0.61	1.28	0.55
5	CORPOSANA	22.1	0.61	1.00	0.60
5	SENASA	6.2	0.61	1.00	0.57
5	INTN	-17.6	0.61	0.69	0.87

Observaciones:

“Dureza calc.” es la dureza calculada en base de los contenidos de Ca²⁺ y Mg²⁺.

“STD calc.” es la suma de los contenidos de los diferentes iones determinados.

Se ha tratado descubrir diferencias sistemáticas entre los resultados de los laboratorios. Aunque la dispersión es grande, los contenidos de Ca^{2+} determinados por el laboratorio del SENASA son significativamente más altos que de los otros dos laboratorios. Para NO_3^- vale lo inverso, luego los contenidos de NH_4^+ y Cl^- determinados por SENASA son más altos que los de CORPOSANA, pero mucho más bajos que los de INTN.

Con base en este diagnóstico y a algunos factores pragmáticos (como la capacidad disponible para analizar la cantidad prevista de muestras) se decidió continuar enviando las muestras al laboratorio del SENASA. Sin embargo, se puede concluir que hay que tener cuidado con métodos de evaluación sensitivos para la propagación de errores, por ejemplo en base a relaciones $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ o $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$.

Finalmente, todos los datos obtenidos fueron sometidos sistemáticamente a algunos chequeos lógicos, para detectar posibles inconsistencias. Debido a estos chequeos y el chequeo final realizado por el laboratorio se ha podido corregir un número de errores. Los chequeos realizados en la versión final de los datos muestran que todavía porcentajes bastante altos de muestras exceden los límites ya relativamente tolerantes (véase la Tabla 3.2). Los errores en el balance iónico indican en casi todas las muestras un excedente de cationes (o un déficit de aniones), como lo demuestra la Figura 3.1. **La conclusión es que en la evaluación de los datos hay que prestar atención solamente a variaciones bastante grandes, ya que las variaciones pequeñas pueden estar afectadas significativamente por los márgenes de error.**

Tabla 3.2 Calidad de los datos según algunos criterios de chequeo

Parámetro de chequeo	Limite superior	Limite inferior	Muestras fuera de los límites
Error en balance iónico	+ 20%	- 20%	35.5%
Cuociente de ST y CE (ST/CE)	100	0.5	1.7%
Cuociente de TDS y CE	0.9	0.5	33.0%
Cuociente de dureza calculada y dureza de laboratorio	1.2	0.8	6.1%
Cuociente de HCO_3^- y de la alcalinidad total	0.7	0.5	0.0%
Turbidez en relación al aspecto:			3.5%
- límpido	5	-	
- ligeramente turbio	10	5	
- turbio	-	10	
Combinación de los 6 chequeos			60%

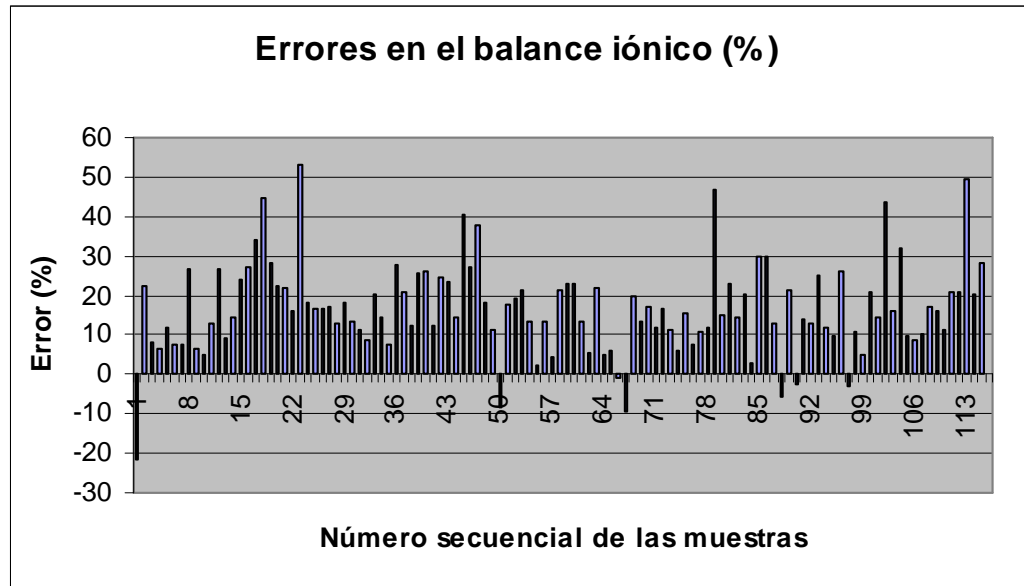


Figura 3.1 Error en el balance iónico de las muestras analizadas

4 Interpretación de los datos

4.1 Los datos obtenidos y sus estadísticas

Los datos obtenidos del laboratorio del SENASA se incluyen en el Apéndice A, en combinación con algunos datos adicionales que caracterizan el pozo y las condiciones hidrológicas locales. El Apéndice B resume los datos producidos por los laboratorios del INTN y de CORPOSANA, con fines de chequeo (véase el capítulo anterior). Sin embargo, la interpretación como está descrita en este capítulo no se basa en estos datos, sino exclusivamente en los datos del laboratorio del SENASA.

Estadísticas de los análisis físico-químico-bacteriológicos de las aguas subterráneas del Acuífero Patino se presentan en la Tabla 4.1. La parte química además, se ilustra en la Figura 4.1. Las estadísticas usados son el mínimo, el máximo y los tres cuartiles (la mediana es el cuartil de 50% de excedencia); además el promedio y el coeficiente de variación (=desviación estándar dividida por el promedio). A continuación se dan algunos comentarios con respecto a la calidad de las aguas subterráneas del Acuífero Patino.

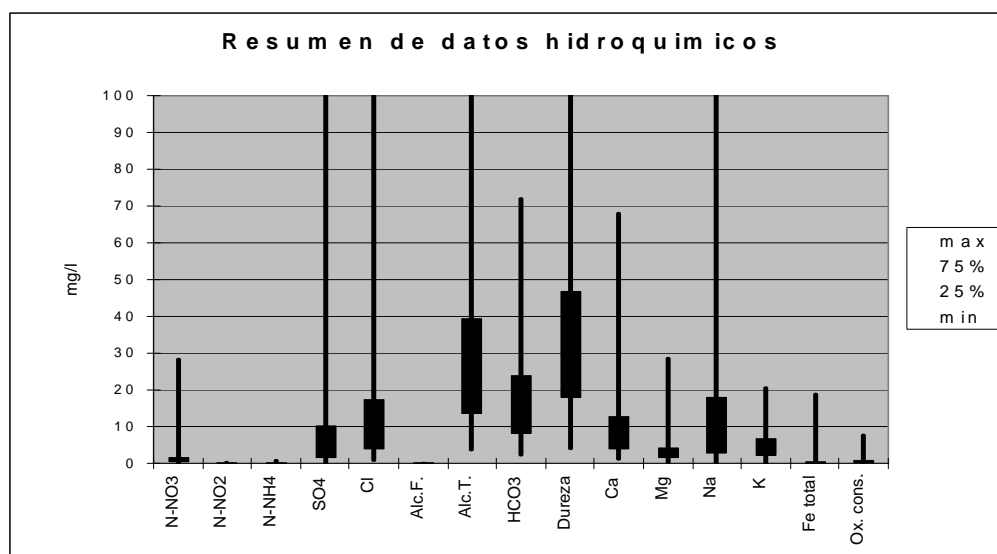


Figura 4.1 Variación de la hidroquímica de las muestras de aguas subterráneas dulces en el Acuífero Patino

Tabla 4.1 Resumen de los análisis físico-químico-bacteriológicos de las muestras del Acuífero Patiño

Parámetro Unidad	ANÁLISIS FÍSICO								BACTERIOLOGICO	
	T °C	Aspecto	Color	Olor	pH	CE μS/cm	Turbidez U.N.T.	ST mg/l	Col.fecales n/100 c.c	Col.totales n/100 c.c
ESTADÍSTICAS:										
No de valores	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
Mínimo	23.0	-	-	-	4.7	33	0.2	42	0	0
25% cuartile	24.9	-	-	-	5.5	67	1.2	100	0	0
Mediano	25.0	-	-	-	5.9	105	1.6	148	0	4
Promedio	25.4	-	-	-	5.9	437	6.5	372	363	1804
75% cuartile	26.0	-	-	-	6.2	238	3.0	220	1	103
Maximo	29.6	-	-	-	7.1	26800	193.0	19248	30000	61200
Coef. de variación	0.05	-	-	-	0.09	6.07	3.19	5.11	8.26	4.40
POTABILIDAD:										
Criterios: Máximo	-	límpido	n.o.	n.o.	10.0	1429	5.0	0	0	0
Mínimo	-	límpido	n.o.	n.o.	5	-	-	0	-	-
No. de violaciones	-	19	18	3	4	1	19	0	28	70
% de violaciones	-	18.8	17.8	3.0	4.0	1	18.8	0	27.7	69.3

Parámetro Unidad	ANÁLISIS QUÍMICO														
	N-NO ₃ ⁻ mg/l	N-NO ₂ ⁻ mg/l	N-NH ₄ ⁺ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	Cl mg/l	Alc.F. mg/l	Alc.T. mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Dureza Mg/l	Ca ⁺² mg/l	Mg ⁺² mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Fetotal mg/l Fe ⁺³	Ox.cons. mg/l
No de valores	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
Mínimo	0.1	0.00	0.00	0.0	1.0	0.0	3.6	2.2	4.0	1.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
25% cuartile	0.6	0.00	0.01	1.7	4.0	0.0	13.9	8.5	18.0	4.0	1.7	2.5	2.4	0.2	0.3
Mediano	1.3	0.00	0.02	5.5	6.7	0.0	19.6	11.9	28.0	6.8	2.4	5.8	4.3	0.2	0.5
Promedio	1.8	0.00	0.04	18.2	130.7	0.0	34.6	21.1	59.4	14.4	7.5	82.3	5.4	0.6	0.9
75% cuartile	1.8	0.00	0.03	10.9	17.7	0.0	40.2	24.5	50.0	12.8	4.4	17.3	6.8	0.4	0.8
Máximo	28.4	0.03	0.89	873	11246	0.0	245	150	1900	420	360	6800	36.5	19.0	15.6
Coef de variación	1.76	2.92	2.63	4.80	8.55	-	1.08	1.08	3.17	2.92	4.78	8.21	0.89	3.27	1.98
POTABILIDAD:															
Criterios: Máximo	10.0	0.10	-	250	250	120	250	-	250	-	-	200	-	0.3	2.5
Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
No. de violaciones	3	0	-	1	2	0	0	-	1	-	-	2	-	28	6
% de violaciones	3.0	0.00	-	1.0	2.0	0.0	0.0	-	1.0	-	-	2.0	-	27.7	5.9

4.1.1 Observaciones generales

La Tabla 4.1 demuestra claramente que ninguno de los parámetros de la calidad del agua tiene distribución estadística simétrica. Los valores medianos siempre están por debajo de los promedios. Para la mayoría de los parámetros es bastante la diferencia entre ambos, entonces indican la existencia de un número limitado de muestras con valores mucho más altos que el mediano. Esto es confirmado por la comparación entre el cuartil de 75% y el máximo, los cuales a veces difieren por algunos ordenes de magnitud. El efecto también se observa en la Figura 4.1, aún un poco reducido en comparación con la Tabla 4.1 por la eliminación de muestras de aguas saladas (en realidad se trata de una muestra solamente – la número 90 en la lista del Apéndice A). El fenómeno es reflejado también en el coeficiente de variación: el coeficiente es bajo para parámetros de poca variación (temperatura, pH), pero muy alto para parámetros como los coliformes, los cloruros, el sodio, los sólidos totales y la conductividad eléctrica, los cuales abarcan varios ordenes de magnitud.

4.1.2 Características físicas de las aguas del Acuífero Patiño

En la categoría de los parámetros físicos, se observa lo siguiente:

- (a) La *temperatura* (medida en el campo) es el parámetro de menor variación. Con su promedio de unos 25°C, es en general algunos grados centígrados por encima de la temperatura media anual, lo cual se explica por el efecto del gradiente geotérmico. Es más baja que las temperaturas de las aguas superficiales durante el período de muestreo (promedio de 32°C), las cuales tienen marcada variación estacional.
- (b) El *pH* (también medido en el campo) indica condiciones ligeramente ácidas en la mayoría de las muestras; contrasten con las condiciones neutrales encontradas en las aguas superficiales.
- (c) La *conductividad eléctrica* (CE) de las aguas subterráneas muestra gran variación. La mayoría de las aguas tiene conductividad muy baja, indicando contenido de sólidos disueltos mínimos, pero en unas pocas muestras se midió conductividad media, hasta muy alta en una sola muestra, donde se explota agua salada (Club Náutico). Sugiere la existencia de diferentes orígenes de las aguas subterráneas.
- (d) La *turbidez* de las aguas es generalmente poca, pero hay unas cuantas muestras muy turbias, aún más que las aguas superficiales muestreadas.
- (e) En un número limitado de muestras se determinó el *cloro residual*, el cual indica si la cloración aplicada produce suficiente protección contra la contaminación bacteriológica. Debido a que el muestreo se enfocó a las aguas no tratadas, no se toma en cuenta en esta evaluación.

4.1.3 Características químicas de las aguas del Acuífero Patiño

Conforme a los valores de la conductividad eléctrica, los contenidos de los componentes químicos disueltos son bajos a muy bajos en más del 75% de las muestras. Las proporciones de los diferentes componentes del balance iónico son muy variables, entonces no se observa un solo tipo hidroquímico, sino una gran variedad de los mismos, como lo demuestra la Figura 4.2. Es conforme con lo que se observa en los estudios de Ríos Otero y otros (1995) y de Carvallo y otros (1995). Ejemplos de los dos tipos más comunes – NaCl y NaHCO₃ –, seguidos por la de frecuencia intermedia - CaCl₂ y Ca(HCO₃)₂ - son ilustrados en esta figura. En general se nota que en las aguas mineralizadas predomina el tipo NaCl, y las bicarbonatadas en las aguas con bajo contenido de sólidos disueltos .

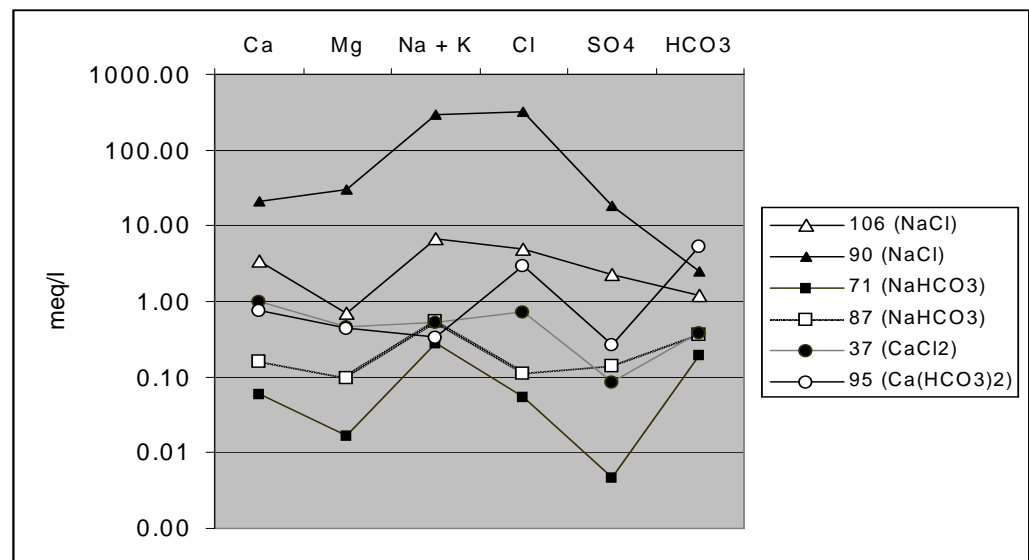


Figura 4.2 Carácter químico de algunas muestras seleccionadas del Acuífero Patiño

Algunas observaciones con respecto a sustancias específicas:

- El *nitrógeno* está presente predominantemente en la forma de nitratos y en menor proporción en forma de amoníaco. Solamente tres muestras tienen contenidos de nitratos que puedan indicar contaminación ligera.
- La *dureza* es generalmente baja, con excepción de la muestra de agua salada
- Los contenidos de *hierro* tienden a ser altos a muy altos, lo cual puede corresponder con minerales de hierro que causan la fuerte coloración rojiza de las areniscas.
- El *oxígeno consumido* – indicador de la presencia de materia orgánica – es generalmente bajo, con excepción de un pequeño número de pozos. Todos aquellos contienen también bacterias coliformes, por lo tanto son pozos contaminados.

4.1.4 Características bacteriológicas de las aguas del Acuífero Patiño

En el 69% de los pozos muestreados se detectaron bacterias coliformes. Su concentración disminuye con mayor profundidad al nivel freático, pero hasta en pozos con niveles estáticos más profundos (40 m en este caso) su presencia ha sido comprobada. En 28% de los pozos se han identificado colonias de coliformes fecales, testigos de la contaminación por excretas humanas. Esta presencia de coliformes indica la vulnerabilidad del sistema acuífero con respecto a la polución.

4.1.5 Características de las aguas superficiales

Se sacaron muestras del río Paraguay (muestra no.89), del lago Ypacaraí (muestras no.6, 7 y 9), del arroyo Yagua Resau (muestra no.8) que alimenta dicho lago y del río Salado por la cual las aguas del lago salen al río Paraguay (muestras no.4, 5 y 44). Además - en la Zona Piloto - del arroyo Ñemby (muestra no.43), del arroyo Mbocayaty (muestra no.45), y del arroyo Guazú abajo de la confluencia de estos dos (muestra no.63).

Todas las aguas superficiales muestreadas son turbias, y todas son severamente contaminadas por coliformes, especialmente el río Paraguay y los arroyos en la Zona Piloto. Los contenidos de hierro son muy altos sin excepción (0.82 – 8 mg/l) y el oxígeno consumido (3.3 – 18.8 mg/l) demuestra concentraciones de materia orgánica en todas las aguas. Se observa en el sistema Yagua Resau – Lago Ypararaí – Río Salado una evolución del tipo de agua de Ca-Na-HCO₃ (Yagua Resau) a Na-Ca-Cl (Lago Ypacaraí) y finalmente a NaCl (Río Salado). En la misma dirección se observa el incremento de la conductividad eléctrica desde 82 (Yagua Resau) a 323 microSiemens/cm (boca Río Salado). En la Zona Piloto es evidente la contaminación del arroyo Mbocayaty (CE = 943) y - por consiguiente - del arroyo Guazú. Ambos son del tipo NaHCO₃. El arroyo Ñemby contrariamente es del tipo Ca-Mg-HCO₃-Cl y tiene conductividad de 171 microSiemens/cm.

La muestra del agua del río Paraguay, finalmente, es del tipo Ca-Na-Cl- HCO₃ y tiene conductividad eléctrica de 127 microSiemens/cm.

4.1.6 Características de aguas subterráneas al otro lado del río Paraguay

Se tomaron muestras de tres pozos al otro lado del Río Paraguay (Bajo Chaco) para comparar su calidad con la del Acuífero Patiño vecino. Son las muestras no. 96, 97 y 98, a distancias de 3 a 5 km del río. Por la predominancia de aguas saladas en el Bajo Chaco, hay muy pocos pozos y solamente se encontraron pozos de poca profundidad, es decir 6 a 8.5 m. El agua de estos pozos es ligeramente turbia, tiene conductividad eléctrica bastante alta (847 – 1095 microSiemens/cm), relativamente altos contenidos de hierro (0.53 a 1.67 mg/l) y de materia orgánica (oxígeno consumido de 8.8 a 18.0 mg/l). La contaminación humana se demuestra por la presencia de coliformes. El

carácter químico es respectivamente NaCl, Na-Cl-SO₄ y NaHCO₃, comparable con muestras cerca al Río Paraguay en el Acuífero Patiño.

4.2 Variaciones y tendencias dentro de la zona

4.2.1 Preparación de mapas

Se utilizó el paquete de software SURFER para preparar mapas que muestran la variación de la calidad del agua dentro de la zona. Las interpolaciones entre valores puntuales fueron realizadas con base en el método de “kriging”, con correcciones locales para tomar en cuenta las condiciones físicas y las deficiencias del método. Aunque el sistema acuífero tiene espesor de unos cientos metros, se agregaron los datos de todas las profundidades, porque faltan los pozos para diferenciar según profundidad. Especialmente cerca al Río Paraguay se ha detectado la existencia de variaciones verticales importantes, con aguas dulces encima de aguas fuertemente mineralizadas abajo. Por lo tanto, solamente hay que prestar atención a las tendencias generales de las mapas y no a los detalles que pueden ser afectados por variaciones verticales. Los mapas principales, presentados en las Figuras 4.3 a 4.14, forman la base para las discusiones en las secciones abajo.

4.2.2 La salinidad del agua subterránea

El contenido de sales disueltas del agua subterránea está directamente correlacionado con la conductividad eléctrica representada en la Figura 4.3. En grandes rasgos se puede observar que la conductividad es muy baja gran parte del área (menor de 200 microSiemens/cm), pero cerca al Río Paraguay aumenta significativamente, hasta el valor de 28600 microSiemens/cm en el pozo del Club Náutico en la península entre la Bahía de Asunción y el Río Paraguay. Experiencias en la perforación y la explotación de pozos han demostrado la existencia de aguas saladas debajo de aguas dulces en una franja de unos kilómetros de ancho bordeando el Río Paraguay entre Limpio y el oeste de Asunción. Los pocos datos documentados sugieren que la profundidad hasta el agua salada disminuye progresivamente a menor distancia del trazado del río, lo cual es compatible con principios de hidráulica de flujo, tomando en cuenta que el Río Paraguay es una base de drenaje con nivel de agua bastante bajo. Hay ciertas indicaciones que dicha faja con agua salada en profundidad es continua también en el tramo entre Asunción e Ypané (véase por ejemplo el estudio geofísico del proyecto FEHS, Informe Técnico 2.4).

Aparte de lo que se observa en la zona mencionada, hay unos pocos pozos dispersos con anomalías de la conductividad, mayormente debidas a contaminación local, según inspección de otros parámetros.

4.2.3 Carácter hidroquímico del agua subterránea (“hidrofacies”)

Las Figuras 4.4 a 4.9 muestran la abundancia relativa de los cationes y aniones principales del agua subterránea, expresados en meq/l. Se observa que el sodio predomina en las cercanías del Río Paraguay (Limpio, M.R.Alonso, parte de Asunción, Lambaré, San Antonio) y el calcio en mayor parte del área restante. El magnesio tiene un papel más modesto, con excepción de una zona entre Luque, San Lorenzo y Capiatá. Entre los aniones se nota tendencias similares, con los cloruros más abundantes en la zona a lo largo del río Paraguay y los bicarbonatos en gran parte de la zona complementaria. Los sulfatos son relativamente importantes en algunas zonas en el norte del área.

La Figura 4.10 es la síntesis de estas observaciones en forma del tipo de agua. Si un cation representa más del 50% de los cationes (en milliequivalentes por litro), el tipo de agua lleva su símbolo; lo mismo es aplicable a los aniones, mutatis mutandis. Se ve en primer lugar que hay gran diversidad en el carácter hidroquímico, además con muchas muestras que no tienen cation y/o anion dominante. Sin embargo, se nota claramente que cerca al río Paraguay son relativamente abundantes los cloruros y el sodio, mientras que los bicarbonatos son más prominentes en las otras partes. Esto sugiere diferencias en origen del agua. En mayor parte de la zona (donde predominan los bicarbonatos) la aguas son producto de la recarga directa y reciente por las lluvias. En la faja a lo largo del Río Paraguay (donde predominan los cloruros y donde hay salinidad mayor), sin embargo, parece que en profundidad hay aguas más antiguas y de origen distinto. Existe la teoría que se trata de aguas saladas provenientes del Chaco que pasan por debajo del Río Paraguay. No es imposible, pero tampoco se ha comprobado. Requiere condiciones muy especiales (niveles piezométricos muy elevados en el dominio salado, posible solo bajo condiciones fuertemente confinados) para poder extenderse hasta cinco kilómetros al otro lado del río, en contra el gradiente hidráulico apreciable observado a profundidades menores. Otra posibilidad – tampoco comprobada - podría ser que el agua salada tiene su origen en una intrusión marina durante el Cenozoico, afectando las zonas con topografía más baja. El carácter químico del agua del Río Salado (tipo NaCl) en sitios hasta más de 15 km del río Paraguay y el contenido relativamente alto de cloruros en las aguas del Lago Ypacaraí podrían apoyar esta teoría, considerando que tienen bastante aporte de aguas subterráneas de la fosa en la cual se encuentran.

4.2.4 Contaminación de las aguas subterráneas

Las concentraciones de los nitratos solamente en pocos lugares hacen sospechar contaminación, puesto que la mayoría de los pozos no tienen niveles altos de nitratos (Figura 4.11). Mediante búsqueda intensiva seguramente es posible identificar sitios con contenidos mucho mayores de nitratos, como lo demuestra el estudio de Ríos Otero y otros (1995). Muy distinta es la imagen representada por los coliformes totales y coliformes fecales. Como se observa en la Figura 4.12, los coliformes están presentes

en toda el área del Acuífero Patiño, aunque con mayor frecuencia en las zonas más densamente pobladas. La misma tendencia vale para los coliformes fecales (Figura 4.13), pero en un porcentaje más pequeño de los pozos (véase también la sección 4.1). En vista de la vulnerabilidad así comprobada del acuífero, no hay duda que muchas sustancias contaminantes no determinadas en la presente campaña ya han llegado en las aguas subterráneas del Acuífero Patiño, amenazando su aptitud para usos domésticos e industriales.

4.2.5 Otras características de las aguas subterráneas

Como se mencionó anteriormente, la turbidez y los contenidos de hierro son bastante altos en las aguas del Acuífero Patiño. Se deben a las características de las formaciones acuíferas (ambos parámetros) y a la construcción y desarrollo de los pozos (turbidez). No se observan tendencias de variación significativa al respecto dentro de la zona. La dureza del agua generalmente es muy baja (menor de 50 mg/l) en el 75% del área, con excepción de las zonas donde las aguas tienen conductividad eléctrica moderada a alta. Altos valores de oxígeno consumido – indicando la presencia de materia orgánica en cantidad apreciable – se constataron solamente en unos pocos sitios cerca al Río Paraguay.

4.3 Potabilidad del agua

Conclusiones con respecto a la potabilidad del agua pueden sacarse comparando los análisis con las normas Paraguayas para la calidad del agua potable (MSPBS, 1993). La Tabla 4.2 resume las conclusiones para las aguas del Acuífero Patiño. Parámetros que son excedidos en un porcentaje apreciable de las muestras son – en orden de frecuencia : coliformes totales, coliformes fecales, hierro, turbidez/aspecto y color. En total, el 78% de las muestras no satisface las normas correspondientes, por lo tanto necesita alguna forma de tratamiento. Sin embargo, es posible que menos del 22% de las muestras sea realmente potable, porque pueden contener exceso de sustancias no determinadas sino mencionadas en las normas Paraguayas, como son varios metales pesados y sustancias orgánicas que afectan la salud.

Cabe observar que de las muestras analizadas del Bajo Chaco y de las aguas subterráneas ninguna cumple con las normas de potabilidad.

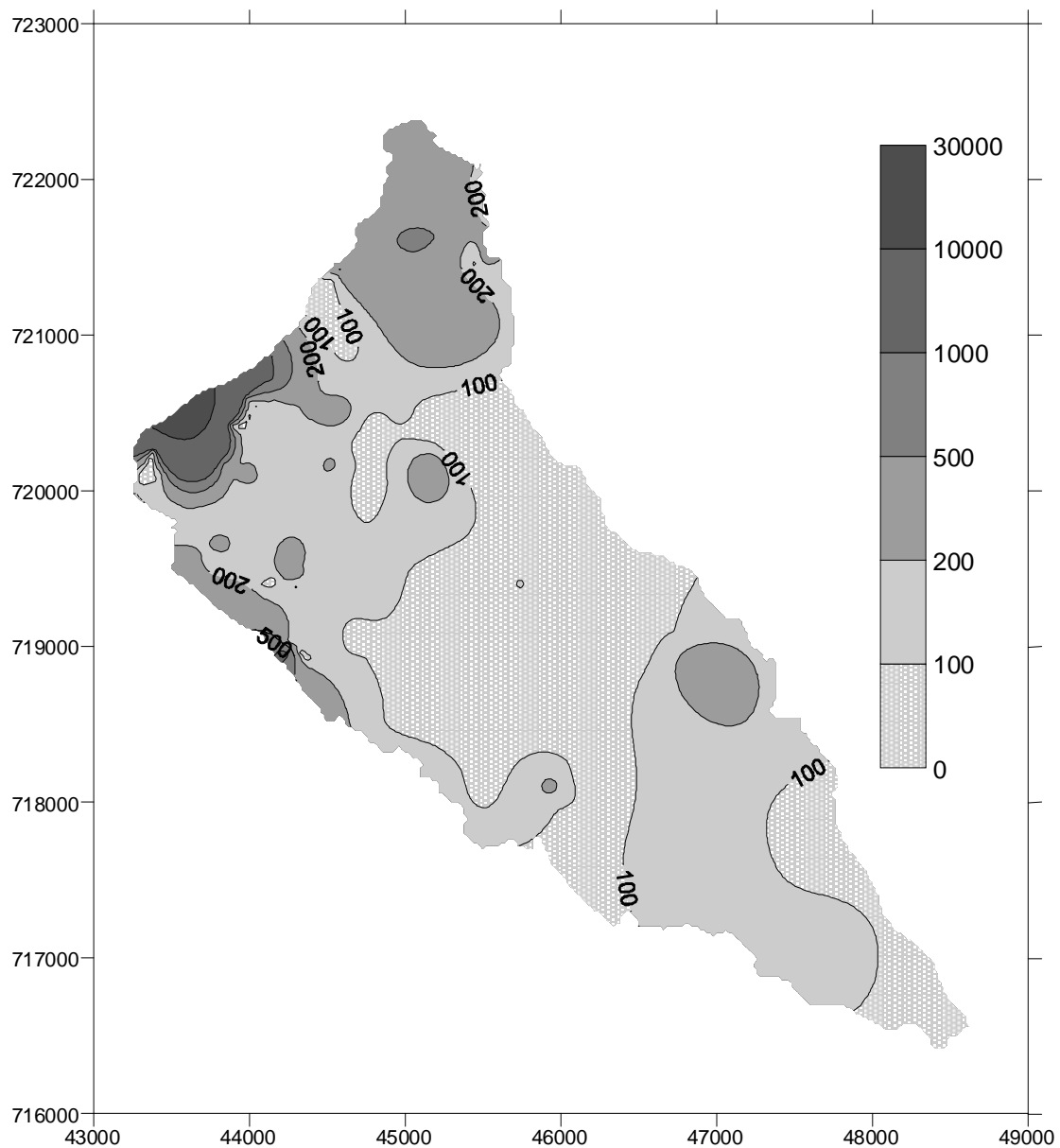


Figura 4.3 Conductividad eléctrica (microsiemens/cm)

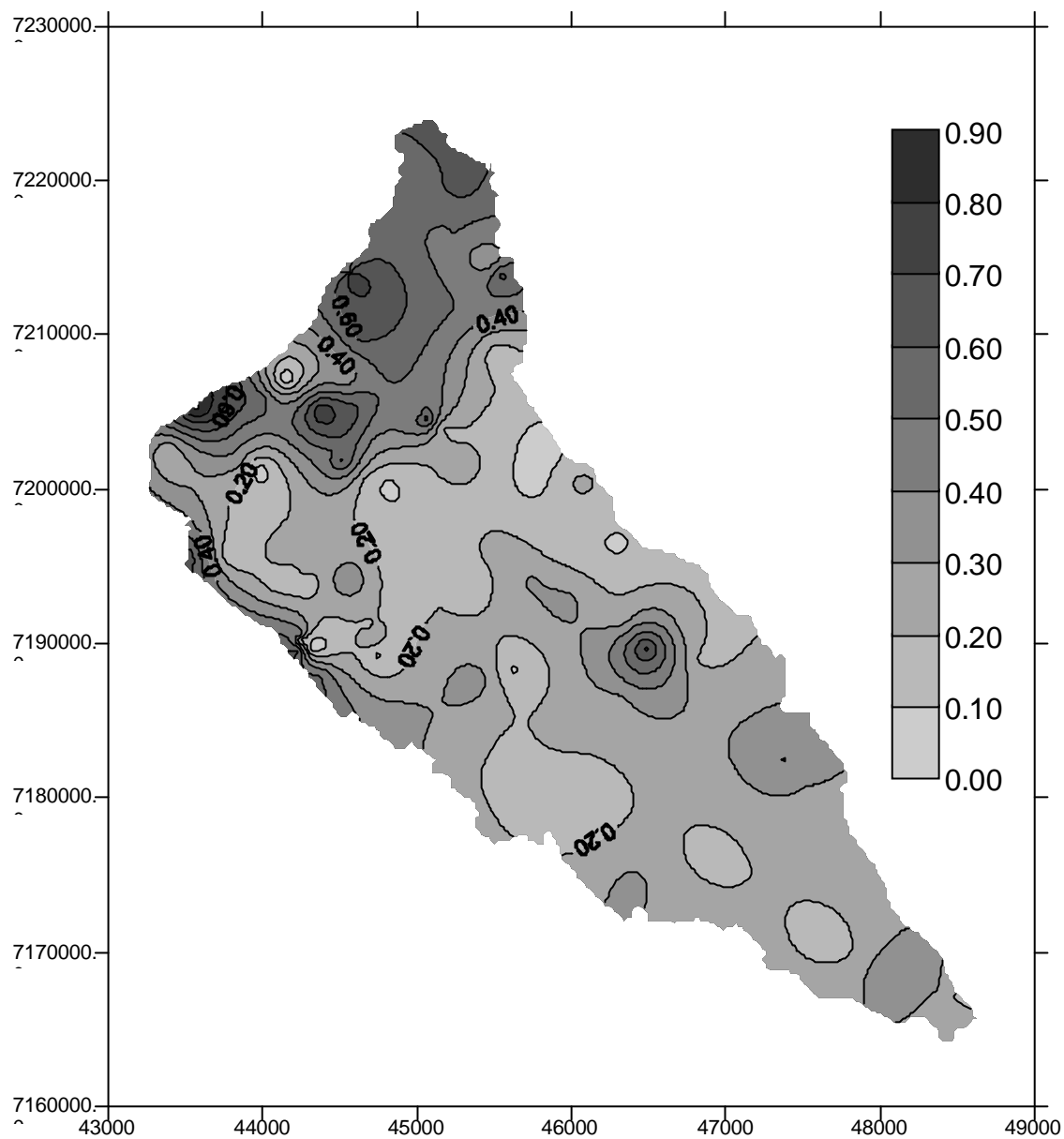


Figura 4.4 Sodio como fracción de los cationes totales (meq/l)

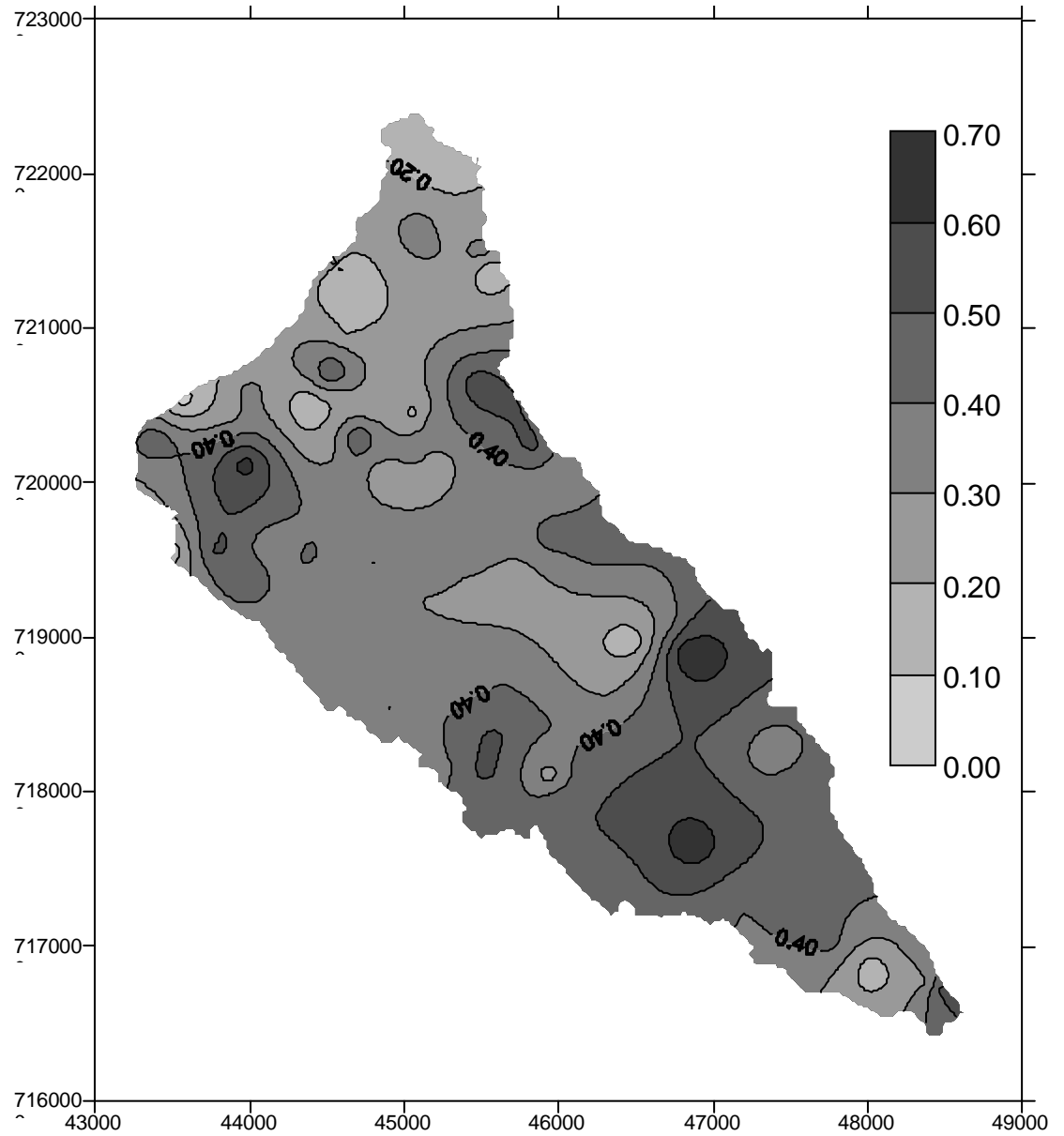


Figura 4.5 Calcio como fracción de los cationes totales (meq/l)

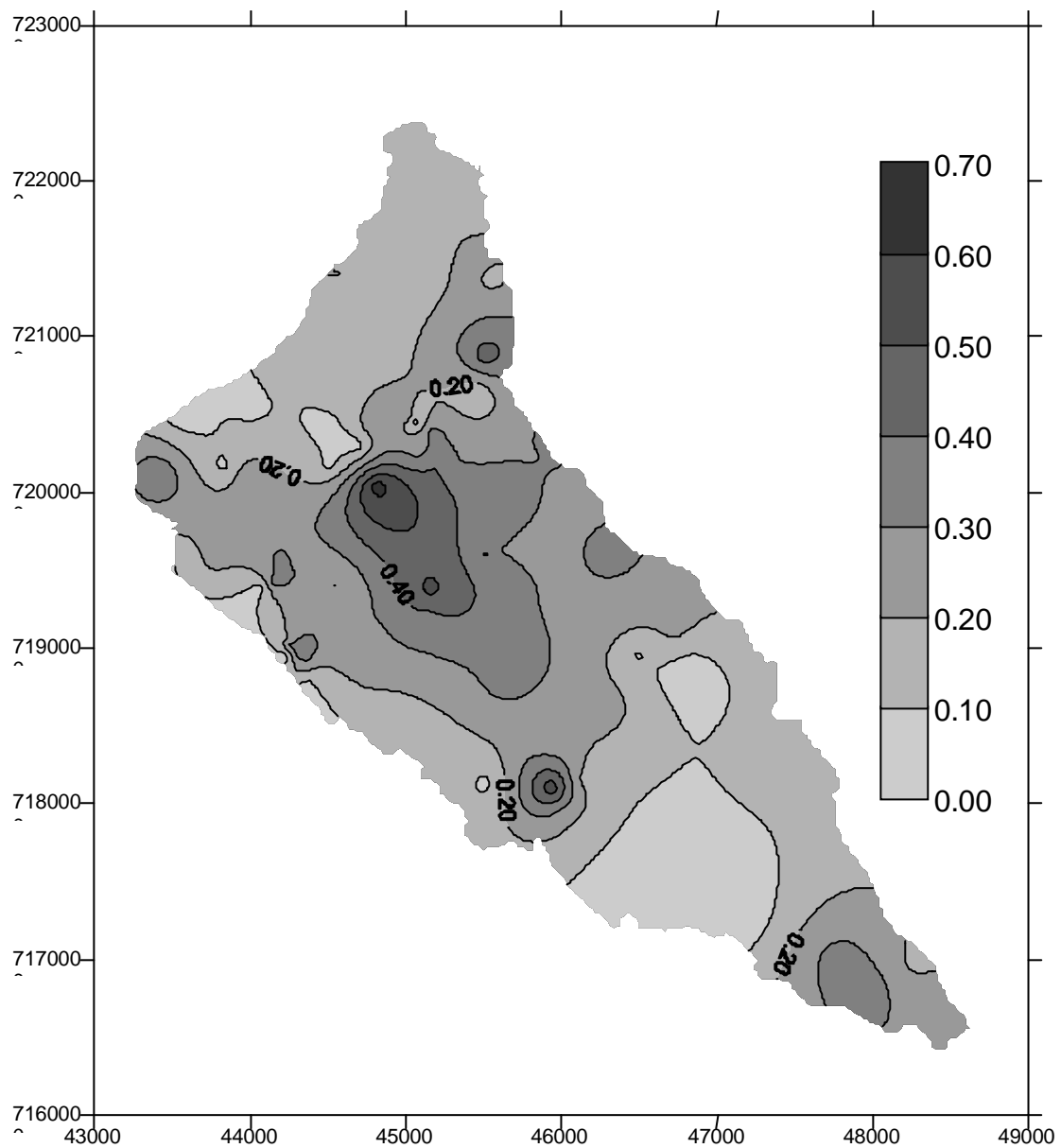


Figura 4.6 Magnésio como fracción de los cationes totales (meq/l)

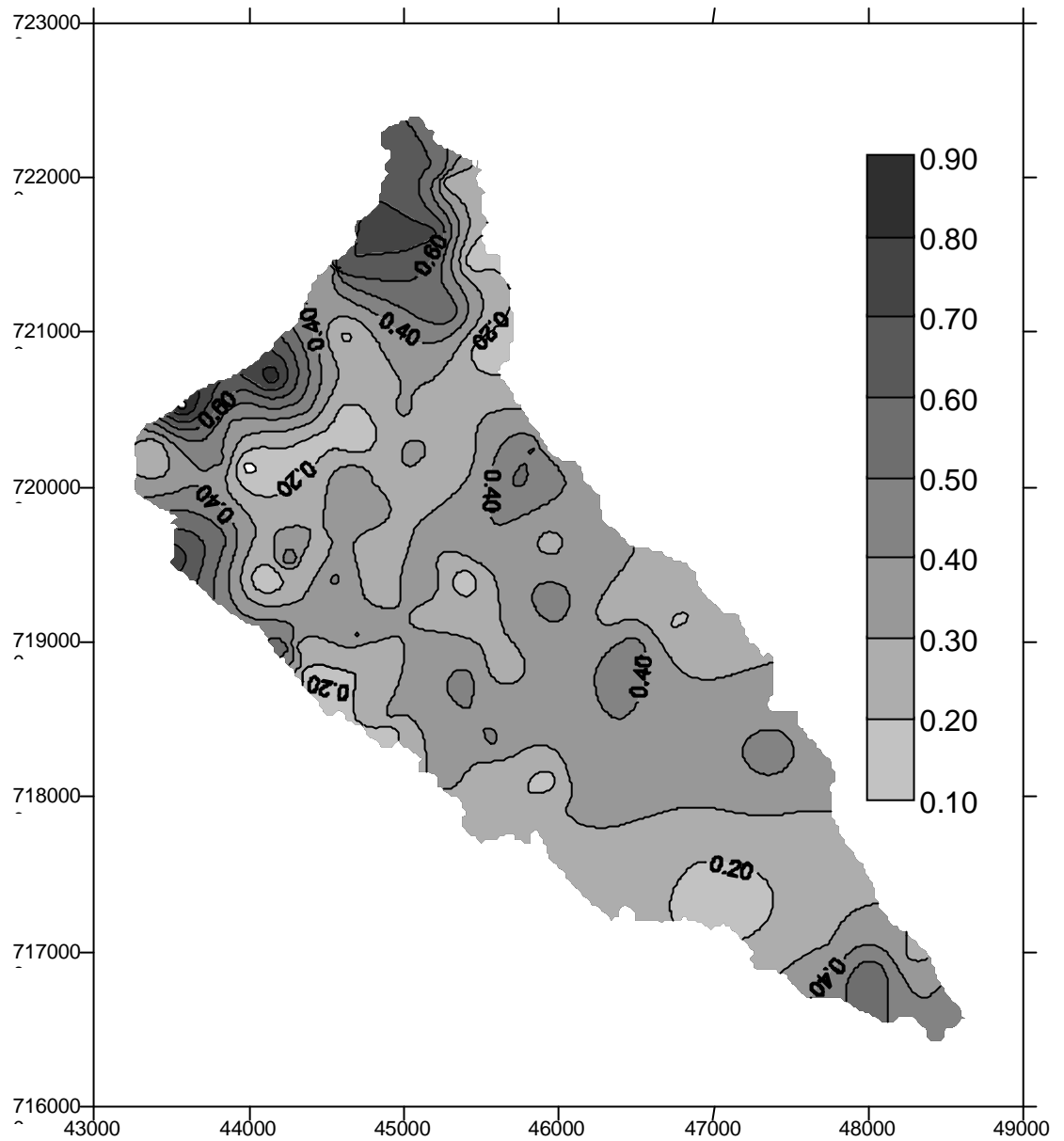


Figura 4.7 Cloruros como fracción de los aniones totales (meq/l)

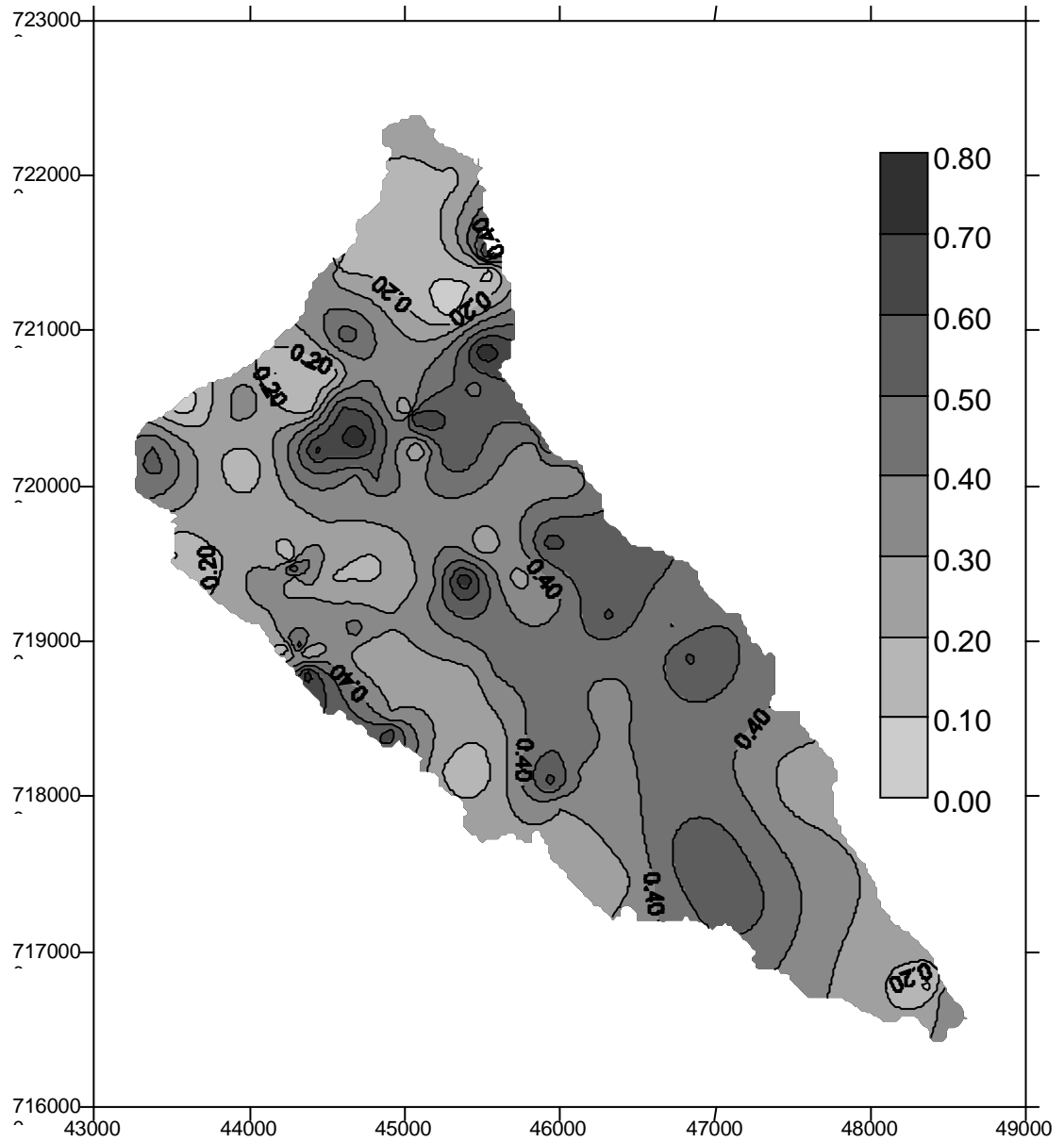


Figura 4.8 Bicarbonatos como fracción de los aniones totales (meq/l)

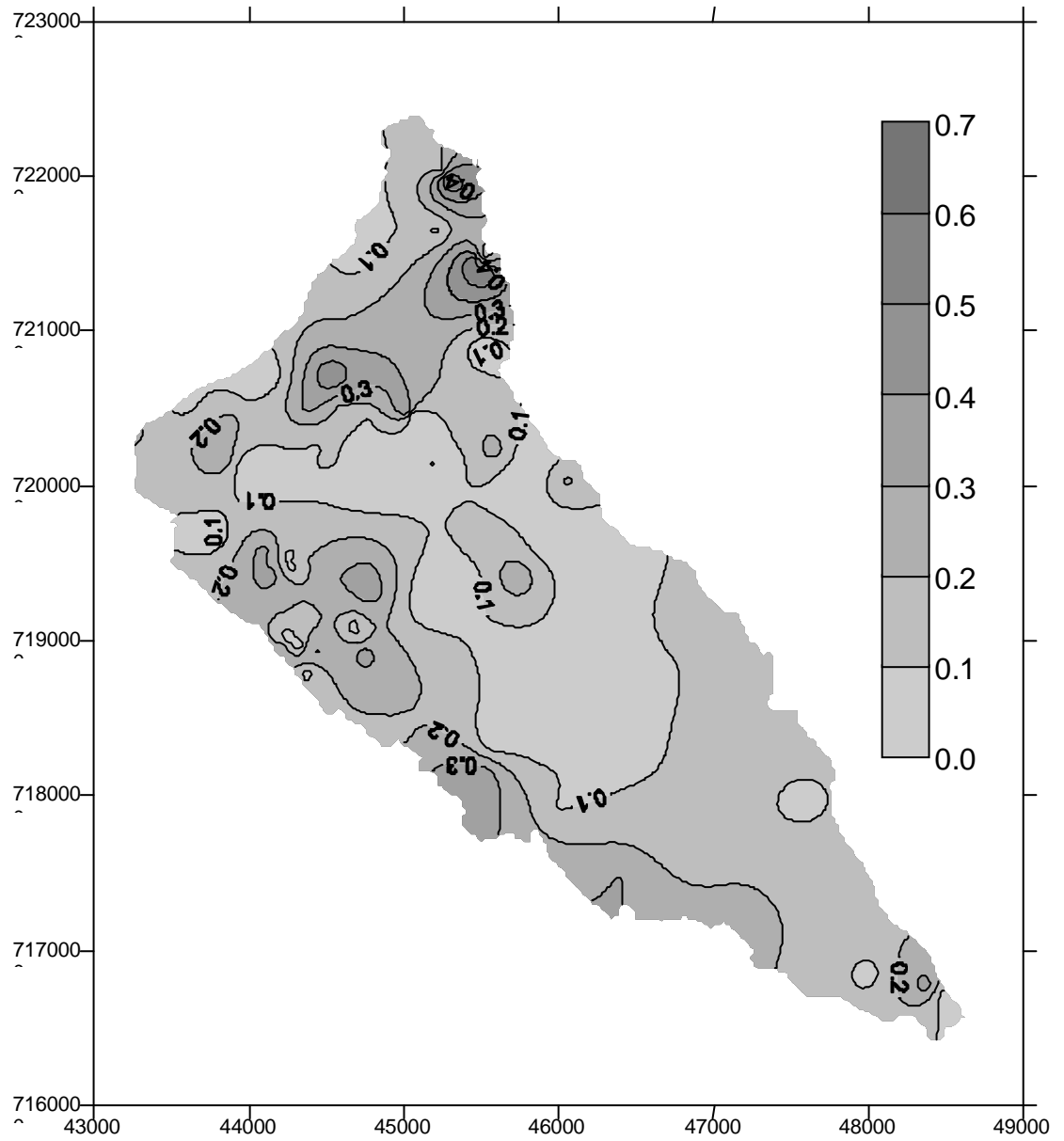


Figura 4.9 Sulfatos como fracción de los aniones totales (meq/l)

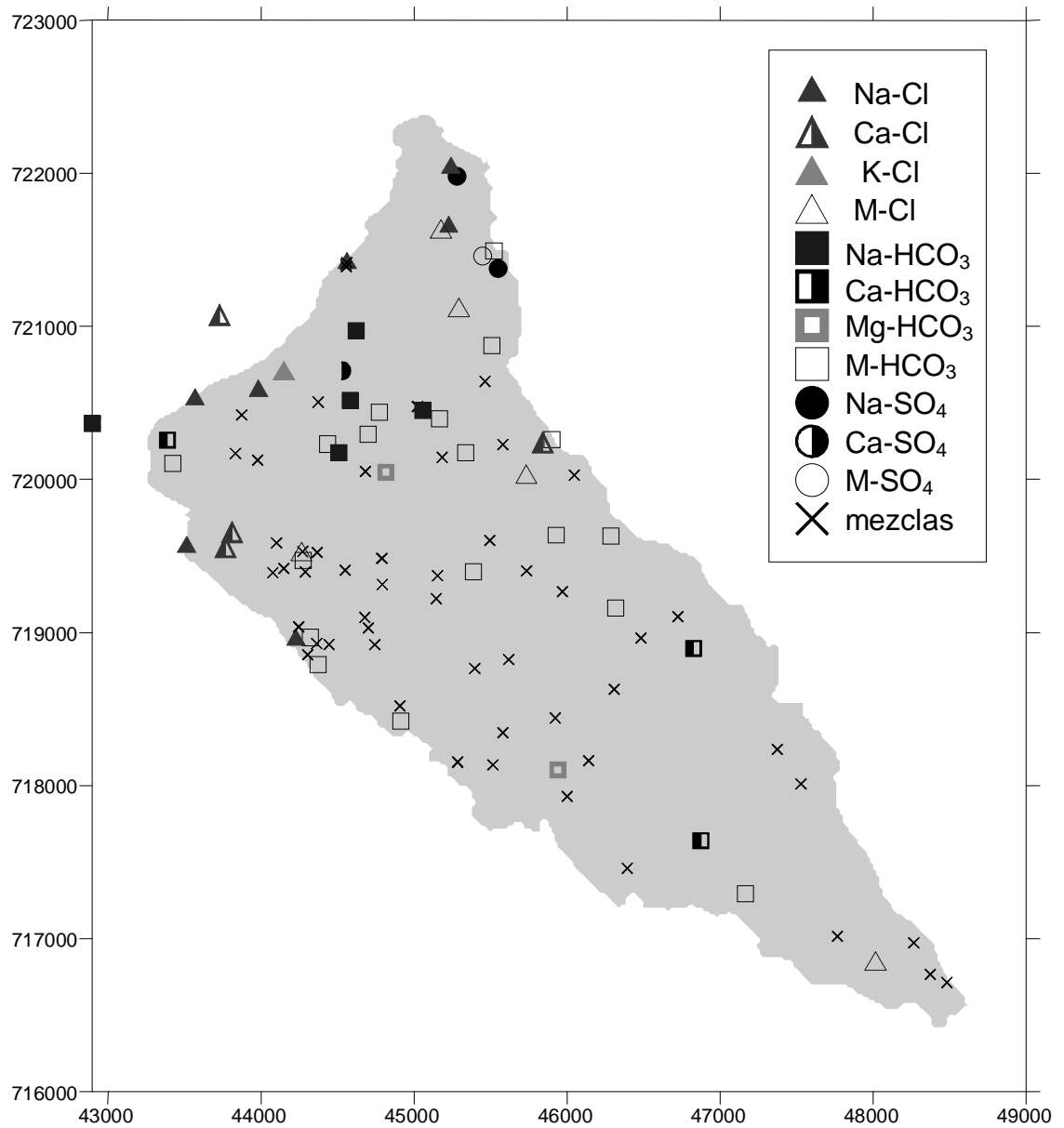


Figura 4.10 Tipos químicos de agua en el Acuífero Patiño

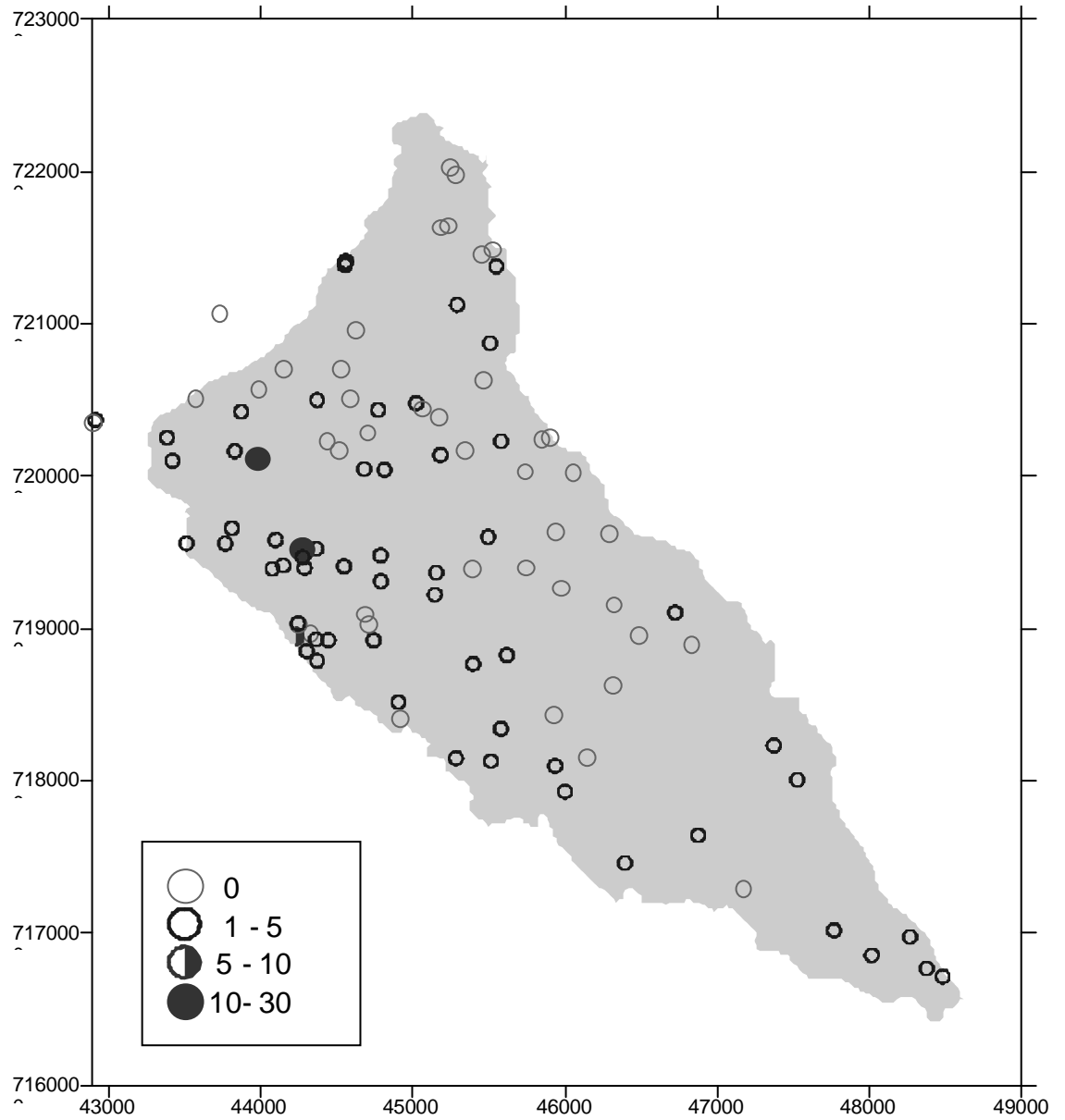


Figura 4.11 Nitratos (en mg N por litro)

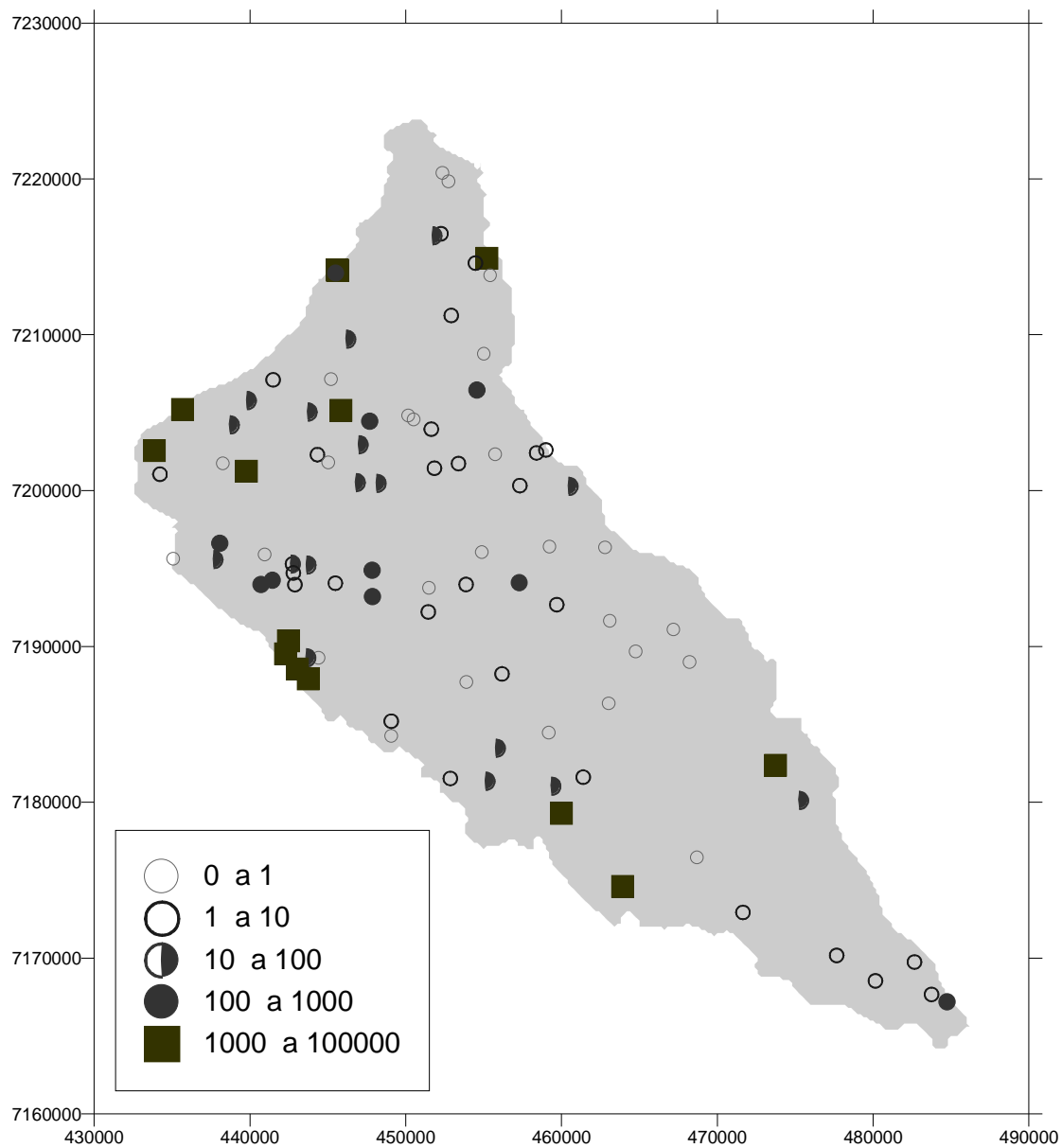


Figura 4.12 Coliformes totales (número de colonias por 100 cc)

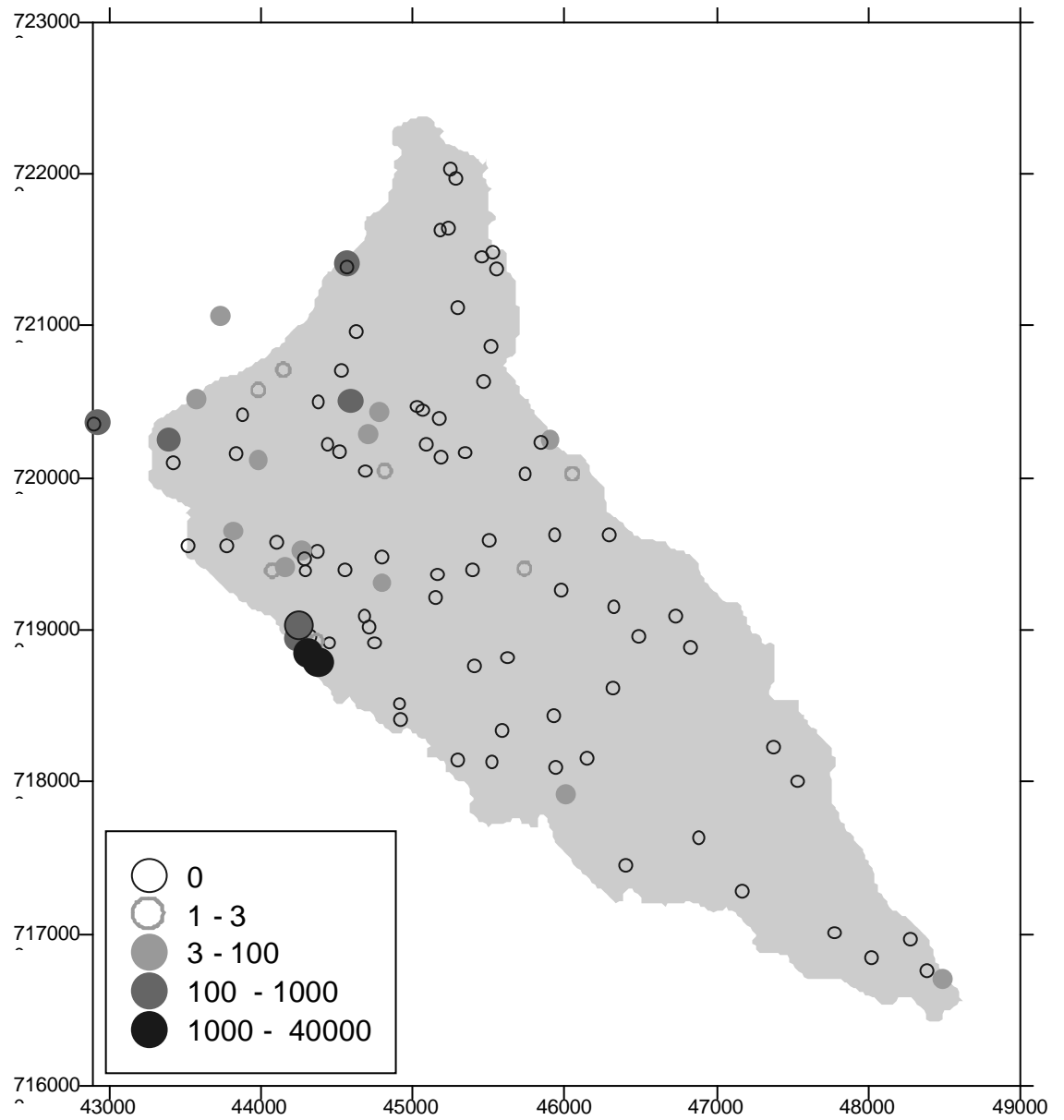


Figura 4.13 Coliformes fecales (número de colonias por 100 cc)

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El muestreo y análisis de aguas han permitido estudiar la calidad de las aguas subterráneas del Acuífero Patiño en un contexto regional.

En general, las aguas son provenientes de la infiltración reciente de lluvias y tienen grado bajo de mineralización. Sin embargo, con excepción de las aguas en una faja de 2 a 8 km a lo largo del río Paraguay, donde en profundidad se ha comprobado o (en otras partes) se asume la presencia de agua salada. Estas aguas saladas de origen antiguo amenazan la calidad del agua dulce que se encuentra encima de las mismas. El origen distinto se refleja también en las características hidroquímicas de las aguas, pero solamente hay hipótesis no comprobadas con respecto al origen.

Casi el 70% de las aguas contiene bacterias coliformes, y en el 28% de las muestras se detectaron coliformes fecales. 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 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 sea aún más pequeño.

La información obtenida indica la marcada vulnerabilidad del sistema acuífero con respecto a polución. Es muy probable que el agua subterráneas en varias zonas esté contaminada con sustancias de origen doméstico o industrial. Son escasas las prácticas de eliminación y saneamiento de contaminantes en la zona, y aquellos fácilmente migran hacia las aguas subterráneas. En parte podrían ser eliminadas por un tratamiento adecuado, pero para ciertos componentes el tratamiento podría ser técnicamente difícil o muy costoso. Por lo tanto, la prevención de la polución de las aguas subterráneas resulta la opción más factible y deseable.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda estudiar la ocurrencia y la movilidad de las aguas salobres y saladas en la faja indicada a lo largo del Río Paraguay. Para tal efecto se prevé la ejecución de sondeos y calicatas geoelectricas, de perforaciones a ambos lados del río Paraguay, la instalación de cables de electrodos, la simulación numérica del flujo simultáneo de aguas saladas y aguas dulces, etc.

Una vez determinada y delineada la presencia de las aguas subterráneas saladas y comprendidos el origen del aguas y los mecanismos de su movimiento, se recomienda diseñar e implementar medidas para evitar la invasión o propagación no deseadas de las aguas saladas.

Se recomienda inventariar en gran detalle todas las fuentes potenciales de polución de las aguas subterráneas en el área del Acuífero Patiño.

A continuación, se recomienda el análisis detallado físico-químico-bacteriológico de aguas subterráneas en los sitios donde los resultados del inventario den sospechas de contaminación. Los elementos específicos del análisis hay que ajustar al tipo de contaminación, y puede incluir metales pesados, hidrocarburos, detergentes, etc.

Con base en el inventario de las fuentes potenciales de polución de las aguas subterráneas, se recomienda elaborar e implementar una normativa para el uso adecuado de sustancias contaminantes y la prohibición de otras.

6 Referencias

- 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.
- Ministerio de Salud Pública y Bienestar Social, 1993. Resolución S.G. No 397, por la cual se establecen normas técnicas respecto a la calidad del agua potable y su distribución. Asunción, 13 de agosto 1993.
- Ríos Otero, Juan; Oscar Martínez 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.
- T & C, 2000. Estudios hidrogeológicos, Yaguarón –Yurú, año 2000. Proyecto SENASA-BIRF-IV.

Apéndice A

Apéndice A Datos de muestreo y análisis

Apéndice A

Apéndice B

Apéndice B Comparación de laboratorios

Apéndice B

Apéndice D