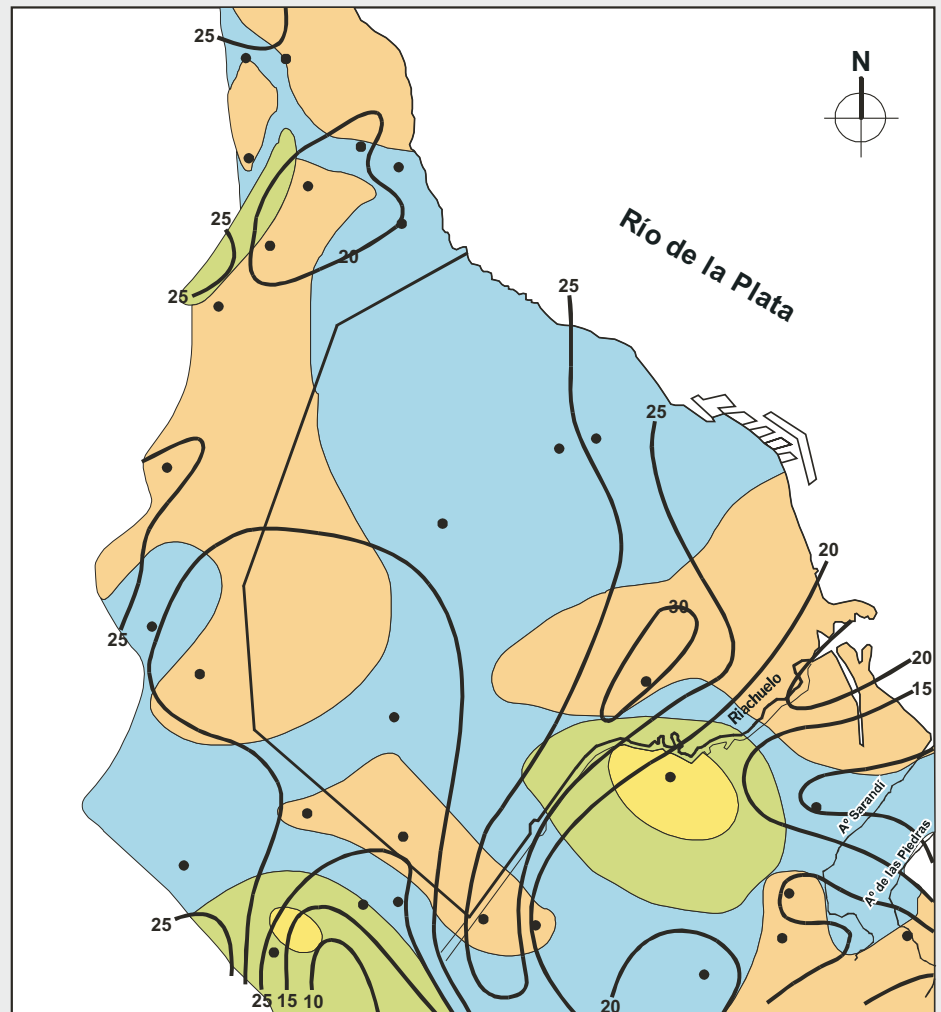


Hidrogeología de la ciudad de Buenos Aires

Miguel Auge *



Hidrogeología de la ciudad de Buenos Aires

Dr Miguel P. Auge

Profesor Titular de Hidrogeología
Departamento de Ciencias Geológicas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

SEGEMAR

SERVICIO GEOLÓGICO
MINERO ARGENTINO

Serie Contribuciones Técnicas
Ordenamiento Territorial N° 6
Buenos Aires - 2005

SERVICIO GEOLÓGICO MINERO ARGENTINO

Presidente Ing. Jorge Mayoral
Secretario Ejecutivo Lic. Pedro Alcántara

INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y RECURSOS MINERALES

Director Lic. Roberto F. N. Page

DIRECCIÓN DE GEOLOGÍA AMBIENTAL Y APLICADA

Director Lic. Omar Lapidó

SEGEMAR

Avenida Julio A. Roca 651 • 10º Piso • Telefax 4349-4450/3115
(C1067ABB) Buenos Aires • República Argentina
www.segemar.gov.ar / segemar@secind.mecon.gov.ar

CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	1
3. GEOLOGÍA y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLOGICO	2
3.1. Postpampeano (Formación Luján + Querandí)	2
3.2. Pampeano (Formación Ensenada + Buenos Aires).....	4
3.3. Formación Puelches o Arenas Puelches	6
3.4. Formación Paraná	7
3.5. Formación Olivos	7
3.6. Formación Martín García	9
4. GEOMORFOLOGÍA	9
5. CLIMA	9
6. BALANCE HÍDRICO	9
7. AGUA SUBTERRÁNEA	11
7.1. Dinámica	11
7.2. Modelo numérico	14
7.2.1. Esquema conceptual	14
7.2.2. Definición areal	17
7.2.3. Módulos de entrada	18
7.2.4. Resultados preliminares del ajuste	19
7.3. Química	20
7.3.1. Cloruros	21
7.3.2. Sulfatos	26
7.3.3. Alcalinidad	26
7.3.4. Residuo seco	26
7.3.5. Dureza	30
7.3.6. Nitratos	30
7.3.7. Sodio	30
7.3.8. Potasio	35
7.3.9. Calcio	35
7.3.10. Magnesio	35
7.3.11. Relación Na/Ca	37
7.3.12. Cambio de bases	37
7.3.13. Aptitud	37
8. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	39
9. AGRADECIMIENTOS	41
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. RESUMEN

El análisis e interpretación de la información existente y de la obtenida con el relevamiento hidrogeológico de los 200 km² que abarca la Ciudad de Buenos Aires, permitió establecer las características y el comportamiento del Acuífero Puelche, que constituye el recurso hídrico subterráneo más importante de la región estudiada, así como de la correspondiente al Conurbano de Buenos Aires y también de la que se ubica en el NE de la Provincia de Buenos Aires, donde el acuífero ocupa unos 92.000 km².

Geológicamente, la disposición estratigráfica, ordenada en el sentido de las edades crecientes, muestra en la culminación de la columna, a los Sedimentos Postpampeanos, representados por las formaciones Querandí y Luján. El Postpampeano se emplaza en las depresiones (Cuenca del Matanza-Riachuelo y Terraza Baja) y está formado por arcillas y arenas muy finas, grises oscuras y verdosas. La Formación Querandí, por su origen marino, contiene agua de elevada salinidad, condición que también afecta a los acuíferos Pampeano y Puelche. Subyaciendo a los Sedimentos Postpampeanos, en los sectores deprimidos del relieve y a la cubierta edáfica o al relleno artificial, en los más elevados, se disponen los Sedimentos Pampeanos, representados por las formaciones Buenos Aires y Ensenada. La mayor trascendencia hidrogeológica del Acuífero Pampeano, es que actúa como vía para la recarga y la descarga del Puelche subyacente y por ende, también para transferirle sustancias contaminantes como los NO₃. Por debajo del Pampeano, se disponen las Arenas Puelches o Formación Puelches, que contienen al Acuífero Puelche, objeto de esta investigación. En el subsuelo de la Capital Federal, este acuífero, constituido por arenas cuarzosas, finas a medianas, con espesores entre 20 y 30 m, almacena un volumen explotable de unos 860 hm³, de los cuales 515 hm³ son aptos para consumo humano. Por debajo del Puelche y hasta el Basamento Cristalino, detectado entre 300 y 400 m de profundidad, se desarrollan las formaciones Paraná y Olivos, la primera de origen marino y la restante continental, pero ambas portadoras de agua con elevados tenores salinos.

El **clima** es templado húmedo con medias anuales de 16,9 °C y 1.160 mm. El 60% de la lluvia se concentra de octubre a marzo, mientras que la estación menos lluviosa es el invierno con el 17% del total, pero a la vez resulta la de mayor exceso en el balance debido a la notoria reducción en la evapotranspiración.

El **balance hídrico** indica, respecto a la lluvia (1.160 mm/a), que el 73% (844 mm/a) retorna a la atmósfera como **evapotranspiración**, un 23% (270 mm/a) **escurre superficialmente** y el 4% restante (46 mm/a) se **infiltra**, recargando al Acuífero Pampeano.

Geomorfológicamente se distinguen dos ambientes con caracteres disímiles. La **Terraza Alta**, se desarrolla por encima de la cota 10 m y hasta la culminación topográfica (cota 27 m). En ella, por debajo de la cubierta edafizada o del relleno artificial, se dispone el Pampeano. En este ámbito tanto el Pampeano como el Acuífero Puelche tienen aguas de baja salinidad (menos de 1g/L). En la **Terraza Baja**, por debajo de la cota de 5 m, se dispone el Querandino marino y por ello el agua subterránea asociada es de alta salinidad en todo el perfil, llegando hasta 24 g/L en el Puelche.

Hidrodinamicamente, el Acuífero Puelche presenta las mayores cotas piezométricas en el borde O de la ciudad, con valores superiores a 15 m sobre cero IGM y desde allí, el flujo subterráneo dominante es hacia el NE y E (Río de la Plata), con una componente secundaria hacia el SE (Riachuelo). La magnitud del flujo subterráneo es del orden de 9.900 m³/día (3,6 hm³/a), con una velocidad efectiva media de 0,2 m/d, para un gradiente hidráulico promedio de $1,2 \cdot 10^{-3}$. Los parámetros hidráulicos que caracterizan al Acuífero Puelche son: transmisividad 500 m²/d, permeabilidad 25 m/d, porosidad efectiva 20%. En lo referente al comportamiento hidráulico, el Puelche actúa como semiconfinado por su techo, lo que permite su comunicación con el Pampeano sobrepuesto, del que se recarga y en el que se descarga naturalmente. La recarga desde el Pampeano, por flujo vertical descendente a través del acuitardo, permite el transporte de sustancias contaminantes como los nitratos, que afectan la potabilidad del Acuífero Puelche en la Ciudad de Buenos Aires y en su Conurbano.

Hidroquímicamente, dominan en la **Terraza Alta** aguas bicarbonatadas sódicas, con tenores salinos menores de 1g/L. En este ámbito la mayor restricción sobre la potabilidad, deriva de los elevados tenores en NO₃, pero pese a ello, el volumen explotable de agua potable en el Acuífero Puelche alcanza una magnitud considerable (515.000.000 m³). En la **Terraza Baja**, el agua subterránea es clorurada sódica, con una salinidad mayor de 2 g/L y un máximo registrado de 24,5 g/L. Esta condición la hace inapropiada para los usos más comunes (consumo humano, riego, industria).

2. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se desarrolló en el ámbito de la Cátedra de Hidrogeología, Departamento Ciencias Geológicas, Facultad Ciencias Exactas y Naturales, con el apoyo económico de un subsidio UBACyT, Programación 1998/2000, constituyendo el primer trabajo hidrogeológico referido específicamente a la ciudad de Buenos Aires.

Un resumen del mismo se publicó con posterioridad, en las actas del XV Congreso Geológico Argentino.

3. GEOLOGÍA Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

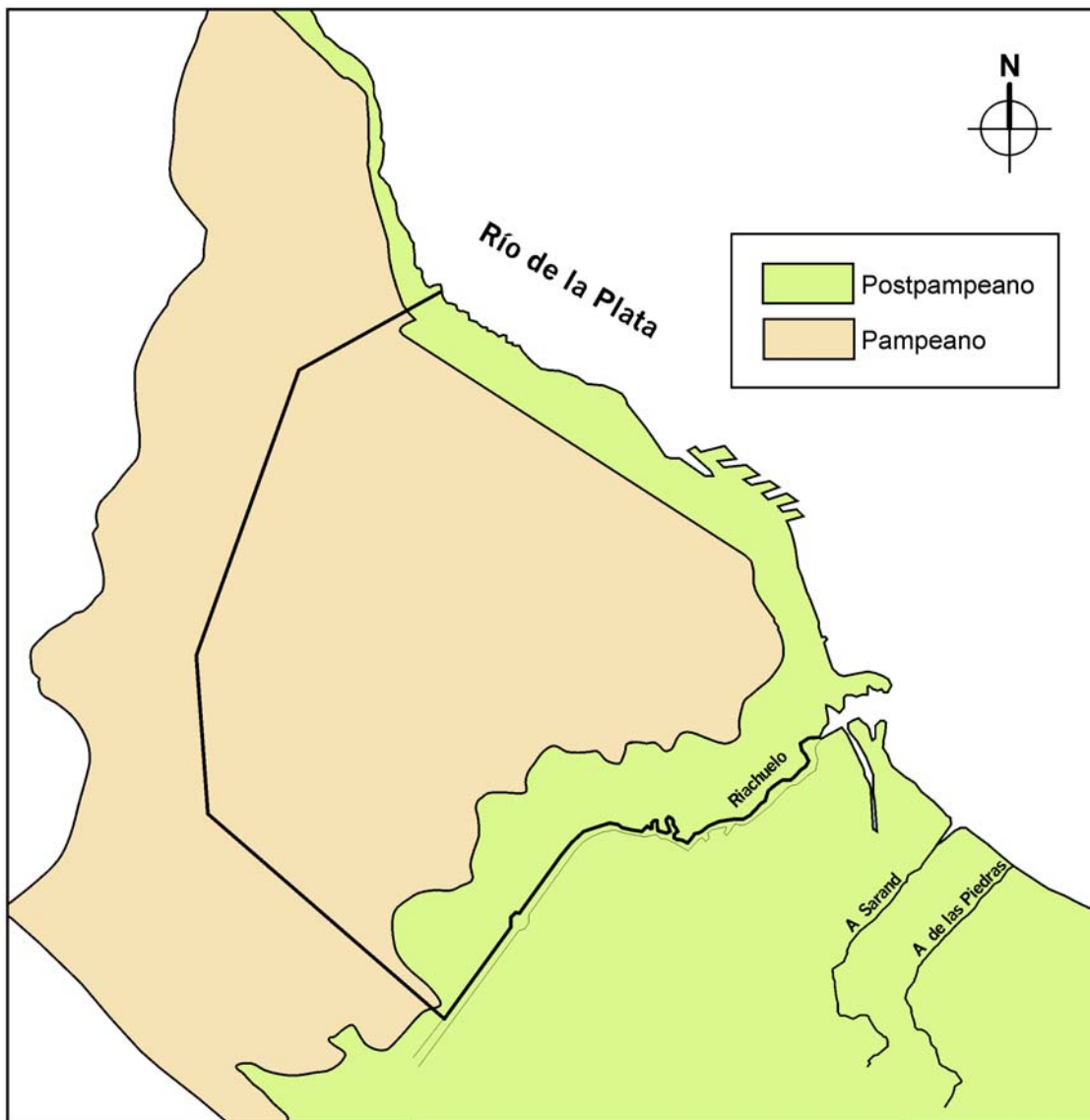
En la configuración geológica superficial de la Capital Federal (esquema 1) participan 2 unidades (Pampeano y Postpampeano).

La primera está integrada por 2 formaciones (Ensenada y Buenos Aires) y el Postpampeano, por las formaciones Luján y Querandí. Las formaciones que se desarrollan exclusivamente en el subsuelo son: Arenas Puelches, Paraná, Olivos y Martín García (Basamento Cristalino).

Se describe a las unidades citadas señalando su comportamiento hidrogeológico (hidráulico e hidroquímico) y comenzando por las más modernas, debido a sus vinculaciones directas con las fases atmosférica y superficial del ciclo hidrológico. En la tabla 1 se sintetiza el comportamiento de las unidades geológicas e hidrogeológicas.

3.1. POSTPAMPEANO (FORMACIÓN LUJÁN + QUERANDÍ)

Debido a la dificultad que implica su diferenciación y a que poseen un comportamiento hidrogeológico similar, se las agrupa en la unidad Postpampeano. La Formación Querandí o Querandino, que es la más



Esquema 1 - GEOLÓGICO

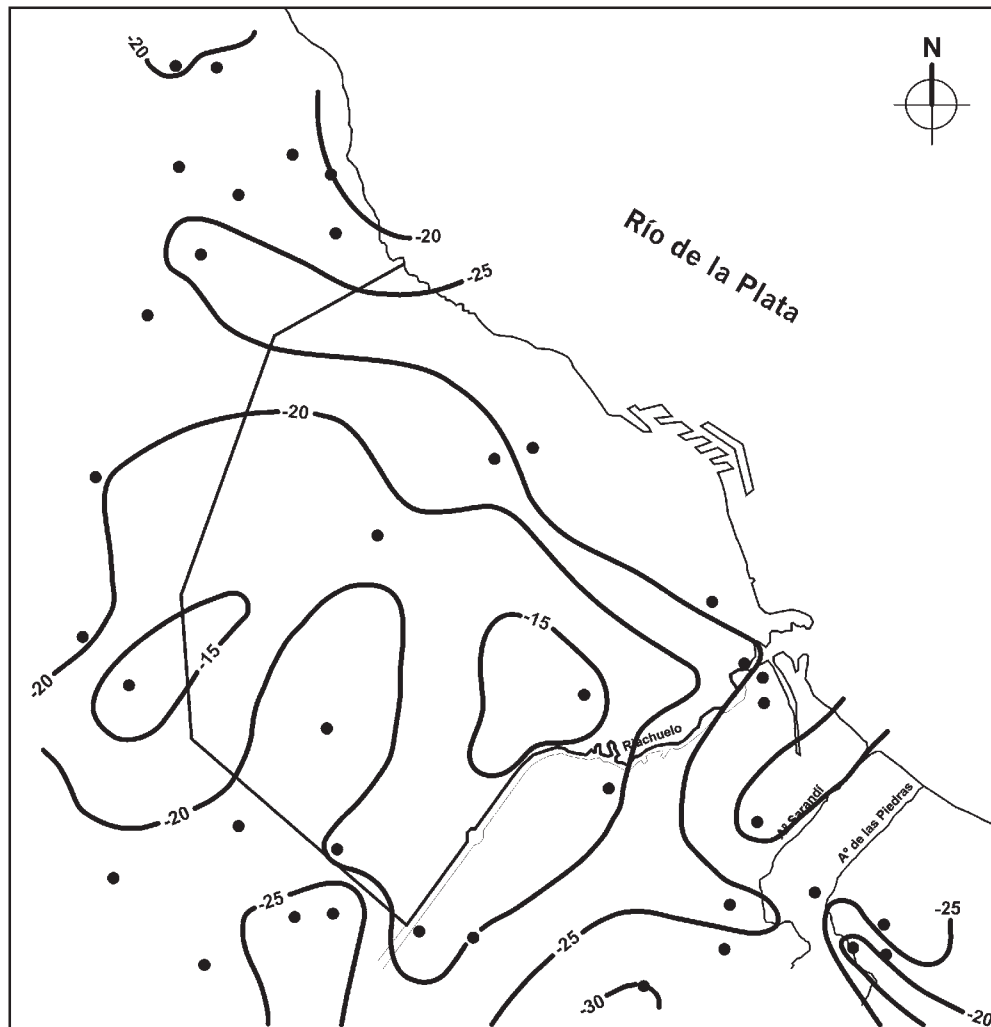
UNIDADES GEOLÓGICAS e HIDROGEOLÓGICAS				
Formación	Espesor m	Edad años	Litología	Comportamiento Hidrogeológico
Postpampeano (Luján + Querandí)	0 a 33	Holocena $10 \cdot 10^3$ a $6 \cdot 10^3$	Arcilla, arena muy fina y arena arcillosa, gris oscura y verdosa. Marino y fluvial.	Acuícludo – acuitardo, hasta acuífero de muy baja productividad (< 1 m ³ /h/pozo). Únicamente en la Terraza Baja. Agua clorurada sódica de alta salinidad (27 g/l).
Pampeano (Ensenada + Buenos Aires)	0 a 45	Pleistocena $2 \cdot 10^6$ a $50 \cdot 10^3$	Limo arenoso y arcilloso, calcáreo (loess), castaño claro. Eólico y fluvial.	Acuífero libre a semiconfinado de media a baja productividad (5-30 m ³ /h/pozo). Agua bicarbonatada cálcica de baja salinidad (< 1 g/l); en la Terraza Baja aumenta la salinidad.
Arenas Puelches	20 a 30	Pliocena sup. a Pleistocena inf. $5 \cdot 10^6$ a $2 \cdot 10^6$	Arena cuarzosa fina y mediana, amarillenta a blanquecina. Deltaico.	Acuífero semiconfinado de alta productividad (30 a 160 m ³ /h/pozo). Agua bicarbonatada sódica de baja salinidad (< 1 g/l); en la Terraza Baja aumenta hasta 45 g/l.
Paraná	62	Miocena inf. a sup. $20 \cdot 10^6$ a $10 \cdot 10^6$	Arcilla plástica verde oscura – azulada y arena blanquecina, fosilíferas. Marino.	Acuícludo en la sección arcillosa y acuífero de alta productividad en la arenosa. Agua clorurada sódica de media a alta salinidad (3 a 20 g/l).
Olivos	289	Miocena inf. a Oligocena $30 \cdot 10^6$ a $20 \cdot 10^6$	Arcilla rojiza, arenisca y arenisca arcillosa, yesíferas y calcáreas. Eólico, lagunar y fluvial.	Acuícludo en la sección arcillosa y acuífero en la arenosa. Agua sulfatada sódica de alta salinidad (10 a 60 g/l).
Martín García (Basamento Cristalino)		Precámbrica $2 \cdot 100 \cdot 10^6$	Aplita y gneis grisáceo muy esquistoso, con vetas aplíticas. Metamórfico.	Basamento hidrogeológico (acuífugo).

Tabla 1

En el mapa 1 se indica la distribución del Pampeano en la Capital Federal y alrededores y debido a que los Sedimentos Pampeanos se emplazan en las partes más elevadas del relieve, se asocian con la geofoma denominada Terraza Alta. El Pampeano prácticamente no se explota en la Capital, donde es necesario deprimirlo o drenarlo, cuando deben practicarse excavaciones por debajo de la superficie freática (cimientos para edificios, túneles, galerías, zanjas profundas, etc.). El abandono de pozos de abastecimiento para agua potable y la salida de servicio de otros empleados por la industria en muchos partidos del Conurbano (San Martín, Lomas de Zamora, San Fernando, Vicente López, Tres de Febrero, San Isidro, Morón), hizo que se produjera un lento ascenso del agua freática

hasta profundidades que comprometen sótanos, cocheras subterráneas y cimientos de edificios, situación que en gran cantidad de casos obliga a drenar por bombeo y en forma permanente al agua freática.

El agua del Pampeano en general es químicamente apta para consumo humano, con salinidades que normalmente se ubican por debajo de 1g/l. En lo referente a su composición, predomina el tipo bicarbonatado cálcico y sódico. En las regiones del Conurbano carentes de redes cloacales el Acuífero Pampeano está contaminado, especialmente la capa freática, por lo que constituye un factor de alto riesgo para la salud de la población, particularmente en aquellos parajes que también carecen de servicios de agua potable.



— -15 — Techo Arenas Puelches (m)

● Perforación de control



Mapa 2 - ESTRUCTURAL TECHO ARENAS PUELCHES

En las vaguadas de las cuencas hidrográficas principales (Matanza, Reconquista, Luján), el Pampeano falta debido a que fue erosionado fluvialmente durante la última glaciación y luego cubierto por el Postpampeano durante la desglaciación posterior. Por lo tanto su espesor varía entre 0 m en dichos ámbitos y unos 45 m en el sector NO de la ciudad, que posee una cota topográfica de +20 m y una cota estructural para el piso del Pampeano de -25 m IGM (mapa 2).

Al Pampeano complejo (Ensenadense + Bonaerense) se le asigna una edad Pleistocena (de 2 millones a 50.000 años).

3.3. FORMACIÓN PUELCHES O ARENAS PUELCHES

Componen una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, finas y medianas, de tonalidades amarillentas a blanquecinas, de origen fluvial y edad Pliocena, que ocupan sin solución de continuidad el subsuelo del NE de la Provincia de Buenos Aires, en una superficie de unos 83.000 km², la mayor parte de los cuales se ubica al N del Río Salado (Auge, 1978). Contienen al acuífero más explotado del país, con predominio de agua apta para la mayoría de los usos.

El agua del Puelche es bicarbonatada sódica con una salinidad total menor de 1 g/l. La calidad desmejora hacia la cuenca del Salado, en las llanuras aluviales de los colectores más importantes (Matanza, Reconquista, Luján), y en la planicie costera adyacente al Río de la Plata (Auge, 1997).

La productividad del Puelche oscila entre 30 y 160 m³/h por pozo y se lo utiliza para consumo humano, para riego y para la industria. Hidráulicamente se comporta como semiconfinado debido a la presencia de un limo arcilloso gris de unos 5 m de potencia que conforma su techo (Ensenadense basal) y que actúa como acuitardo. Donde el acuitardo falta, el limo castaño del Ensenadense grada a limo arenoso y finalmente a arena franca.

Las Arenas Puelches poseen estratificación gradada, con aumento de tamaño hacia la base donde suelen presentarse arenas gruesas y hasta gravillas. El ámbito de sedimentación de la Formación Puelches pareciera corresponderse con un protodelta, que se extendió bastante más al SO que el Delta actual.

En el mapa 2 se representa la conformación estructural del techo de las Arenas Puelches, que constituye una superficie de discordancia erosiva sobre la que se asentó el Ensenadense basal (base del Pampeano). Las cotas más frecuentes varían entre -15 y -25 m IGM. En la figura también se aprecia una suave profundización del techo

del Puelche hacia el Río de la Plata, dado que de valores de -15 m en el extremo SO de la ciudad, se pasa a -25 m en la cercanía de la ribera de dicho río, con una inclinación de 1,2 m/km.

El mapa 3 reproduce la configuración estructural del piso del Puelche, que también coincide con una discordancia erosiva, pero en este caso en el techo de la Formación Paraná. Las cotas del piso varían entre -40 m en el sector S de la ciudad y -55 m en el sector NE (ribera del Río de la Plata). Como sucede con el techo, también la base de las Arenas Puelches inclina hacia el NE, pero con un gradiente algo mayor (1,5 m/km). Este gradiente es prácticamente igual que el topográfico siguiendo la antigua traza del A° Maldonado, que es de 1,4 m/km.

En el mapa 4 se representa la variación de espesor del Acuífero Puelche y el porcentaje de arena en el mismo. El espesor del Puelche varía entre 20 y 30 m, con un alto cerrado de más de 30 m en el sector SE y un mínimo de 20 m, cercano al anterior, en la vecindad del Riachuelo. El mapa isopáquico constituye la base para calcular la reserva de agua almacenada. En este caso, el volumen de arena contenida en el ejido del distrito federal es de unos 4.300 hm³. Asumiendo para el Puelche una porosidad efectiva del 20%, el volumen de agua gravitacional almacenada es de unos 860 hm³. De ese volumen aproximadamente 515 hm³ son aptos para consumo humano, siendo los principales limitantes de la potabilidad, los NO₃ y la salinidad total.

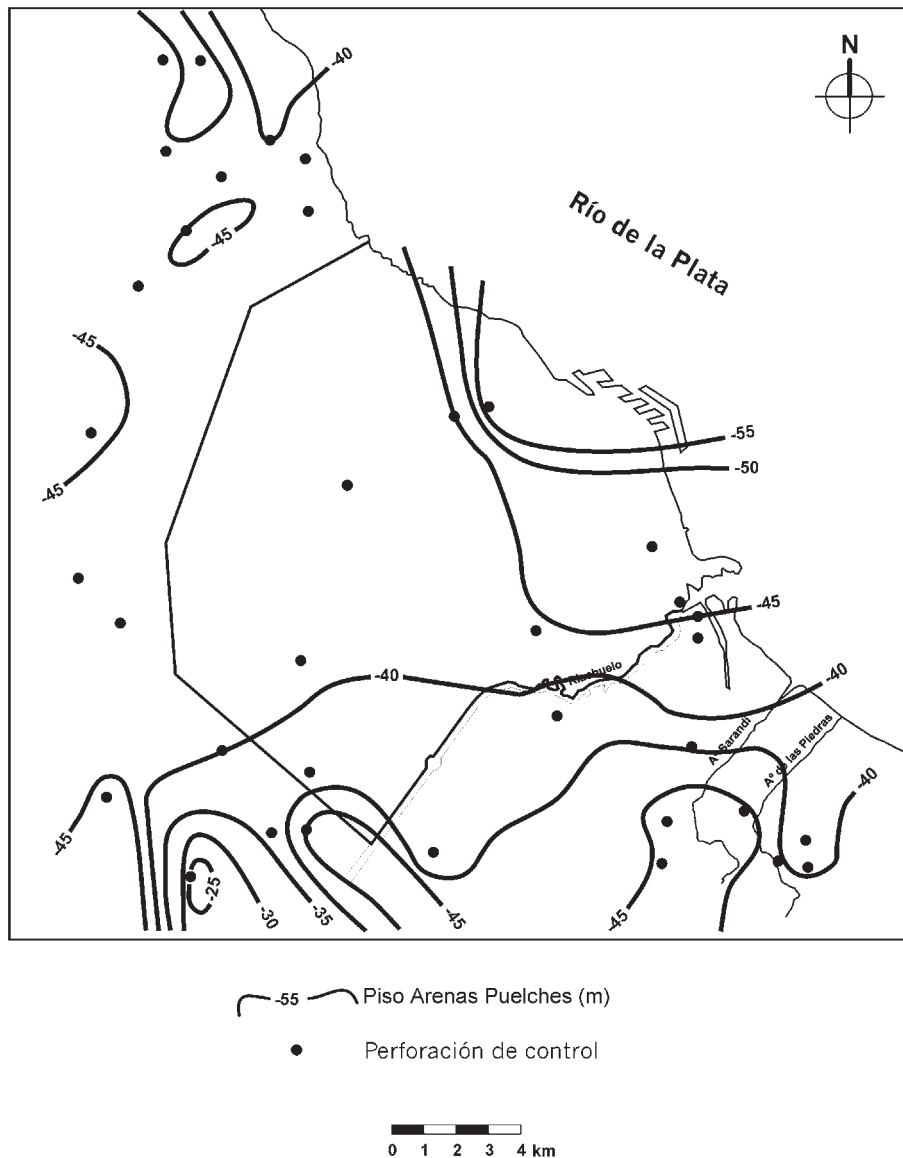
El mapa 4 también reproduce el porcentaje de arena franca respecto al espesor total del Acuífero Puelche y su interés práctico radica en que los valores más altos se corresponden con las mayores permeabilidades. Por lo tanto la combinación de espesor y porcentaje de arena resulta un claro indicador de las áreas más y menos favorables respecto a la productividad.

Del mapa se desprende un comportamiento relativamente uniforme, con valores dominantes superiores al 50%, salvo un pequeño sector en el SE, vecino al Riachuelo, que presenta un porcentaje de arena franca entre 25 y 50.

De los tres ámbitos que registran más del 75%, el sitio con mejores perspectivas es donde se manifiesta el mayor espesor del Acuífero (30 m) y el menos favorable respecto al caudal, es el que presenta un espesor entre 15 y 20 m y un porcentaje de arena entre 25 y 75 (sector SE - Riachuelo).

En la Perforación Puente La Noria el Acuífero Puelche, emplazado entre 38 y 50 m de profundidad, registró una salinidad total de 46 g/L con 24 g/L de Cl. El capítulo 7.3. trata específicamente sobre hidroquímica.

A las Arenas Puelches se les asigna una edad que va desde el Plioceno superior (5.10⁶ años) al Pleistoceno inferior (2.10⁶ años).



Mapa 3 - ESTRUCTURAL PISO ARENAS PUELCHES

3.4. FORMACIÓN PARANÁ

También conocida como “El Verde” o como “Arcilla Verde o Azul” por los perforistas, es una secuencia predominantemente arcillosa con intercalaciones arenosas, de tonalidades fuertemente verdosas en las secciones arcillosas y blanquecinas a grisáceas en las arenosas. Su origen marino está documentado por la presencia de abundantes fósiles.

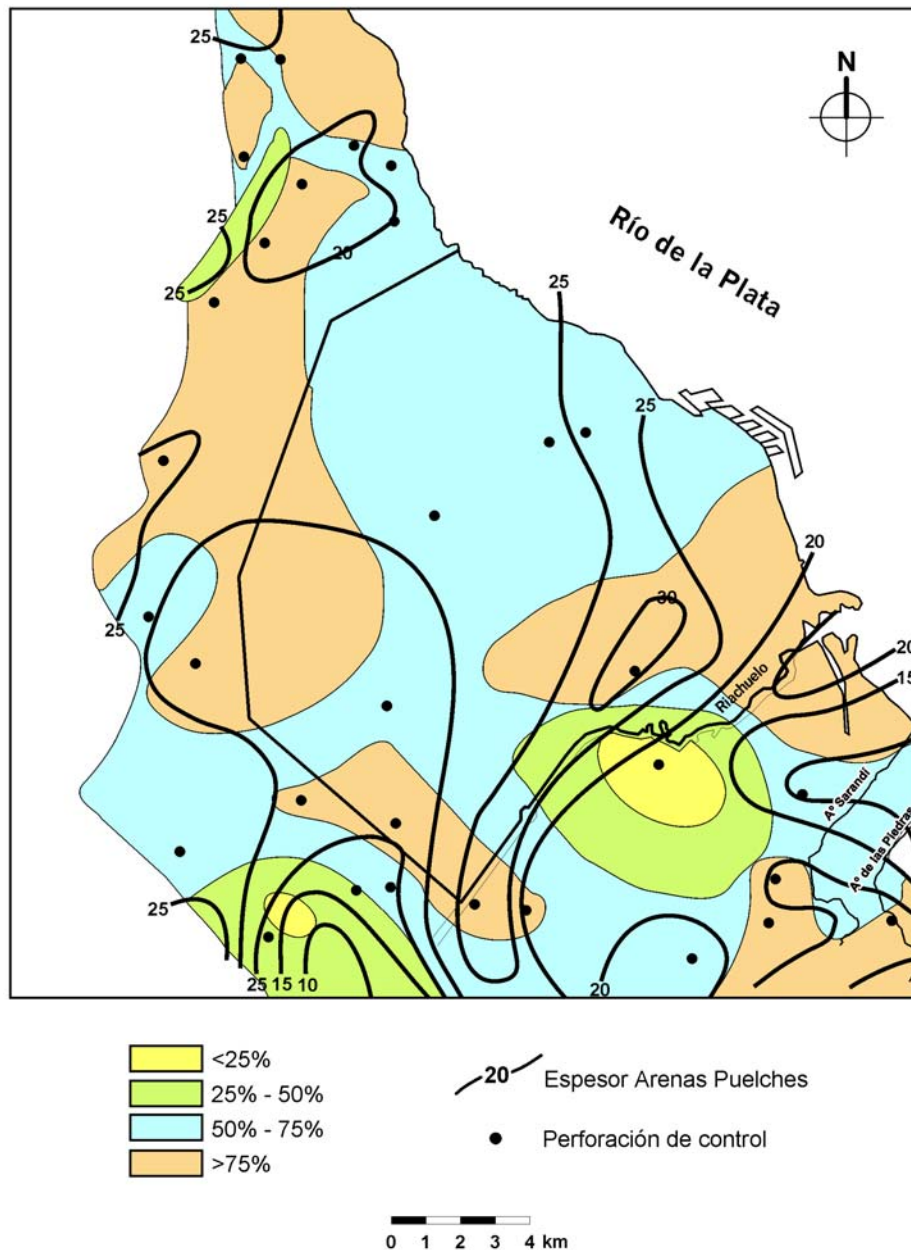
La ingesión del Mar Paraniense ocupó un sector importante de la Argentina y la mayor parte de la Provincia de Buenos Aires, dado que sólo quedaron emergentes los 2 ámbitos serranos (Tandilia y Ventania) y el interserrano que los ensambla. Del Mioceno inferior para algunos ($20 \cdot 10^6$ años) y del superior para otros ($10 \cdot 10^6$ años), el Paraniense se caracterizó por ser un mar de poca profundidad, menos de 100 m (Yrigoyen, 1993).

El origen marino de los sedimentos que contienen al Acuífero Paraná hace que sus aguas presenten tenores salinos elevados, entre 10 y 30 g/L (Auge et al, 1984). Sin embargo en la planicie de inundación del Matanza–Riachuelo y en la costa del Río de la Plata, una capa de arena ubicada entre 80 y 90 m de profundidad aproximadamente, con una salinidad total de 3 a 4 g/L, constituye el acuífero de mejor calidad química y por ende el más utilizado, especialmente por la industria.

En la Perforación Riachuelo # 3, la Formación Paraná se extiende entre 52 y 115 m, con predominio de arcillas en el 70% de la sección.

3.5. LA FORMACIÓN OLIVOS

También conocida como Mioceno Rojo o “El Rojo”, se emplaza inmediatamente por debajo de la Formación



Mapa 4 - PORCENTUAL E ISOPÁQUICO ARENAS PUELCHES

Paraná, mediando entre ambas una discordancia erosiva. El Rojo es continental, de origen preferentemente eólico y/o lagunar, aunque la presencia de arenas medianas y gruesas, también indica participación fluvial. La existencia de abundante yeso distribuido en todo el perfil, permite interpretar una condición de marcada aridez durante su sedimentación.

En el perfil de la Perforación Riachuelo # 3, El Rojo se extiende entre 115 y 404 m de profundidad, donde se inicia la Formación Martín García = Basamento Cristalino. La sección superior (de 115 a 229 m) es predominantemente arcillosa, formada por arcillas pardo rojizas, compactas, fragmentosas, calcáreas y yesíferas. En la sec-

ción inferior predomina la fracción arena, entre 229 y 404 m, con areniscas y areniscas arcillosas, rojizas y amarillentas, yesíferas y calcáreas, mientras que en los últimos 6 m (398 a 404), se presenta un conglomerado basal, rojizo, con matriz areno-arcillosa y abundante yeso.

La Formación Olivos presenta agua sulfatada y con alto tenor salino, 10 a 60 g/L (Auge et al, 1984) y en la perforación tipo registró entre 14 y 20 g/L de salinidad total, con unos 5 g/L de SO_4 y una surgencia máxima de 11 m.

Al Rojo se lo considera del Mioceno inferior ($20 \cdot 10^6$ años) o del Oligoceno ($30 \cdot 10^6$ años).

3.6. FORMACIÓN MARTÍN GARCÍA

Se la denomina así pues conforma el sustrato que dio origen a la isla homónima, donde se manifiesta aflorando en la mayor parte de la misma. Está formada por rocas metamórficas de grado intermedio (micasquistos), cuya edad fue estimada en más de 2.100 millones de años (Dalla Salda, 1981). En la Perforación Riachuelo # 3 se desarrolla a partir de 404 m y está formada por aplita y gneis grisáceo muy esquistoso con vetas aplíticas. En otros puntos se lo ubicó a 301 m en Bartolomé Mitre y Paraná (Iglesia La Piedad), a 291 m en el Jardín Zoológico y a 486 m de profundidad en la ciudad de La Plata.

El Basamento Cristalino también aflora en las Sierras de Tandil, hundiéndose rápidamente hacia la cuenca del Salado, donde en la Bahía de Samborombón se lo estima a 6,5 km de profundidad, a partir de prospección sísmica. Hidrogeológicamente se comporta como la base impermeable del sistema hidrológico subterráneo.

4. GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio abarca las cuencas de los arroyos Vega y White y parcialmente las del Maldonado, Medrano y Matanza-Riachuelo.

En la ciudad de Buenos Aires se destacan dos geoformas, que además ejercen un marcado control en la composición y salinidad del agua subterránea: Terraza Alta y Terraza Baja. La **Terraza Alta** se desarrolla por encima de cota 10 m, hasta la culminación topográfica de la ciudad a cota 27 m en Villa Devoto (Yrigoyen, 1993) y en ella, por debajo de la cubierta edafizada, se dispone el Pampeano. Los acuíferos Pampeano y Puelche tienen aguas de baja salinidad (menos de 1 g/L) en coincidencia con esta geoforma y el segundo, del tipo bicarbonatado sódico. En la **Terraza Baja**, por debajo de cota 5 m, se presenta el Postpampeano predominantemente marino y por ello el agua subterránea es de alta salinidad en todo el perfil (hasta 24 g/L en el Puelche), dominando el tipo clorurado sódico. El ensamble entre ambas terrazas es una geoforma de restringida expresión areal y por ende de escasa importancia hidrogeológica (Escalón).

Dado la coincidencia entre las terrazas Alta y Baja con el Pampeano y Postpampeano respectivamente, el mapa geológico es hábil para visualizar la extensión areal de ambas geoformas.

5. CLIMA

Es templado - húmedo, de acuerdo a la clasificación de Knoch y Borzacov (1947). La temperatura media anual fue de 16,9 °C (1901/90), con enero como el mes más cálido, con una media de 23,9 °C y julio como el más frío con 10,5 °C. La precipitación media anual fue de 1.160 mm considerando el lapso 1957/00 (Estación Villa Ortúzar). De octubre a marzo se concentra el 60% de la lluvia, con los mayores registros en marzo (122 mm), enero (121 mm) y octubre (120 mm). Los meses menos lluviosos son junio (65 mm), agosto (67 mm) y julio (69 mm). Sin embargo en invierno es cuando se da el mayor exceso en el balance hídrico, debido a la notoria reducción de la evapotranspiración respecto al verano.

La tabla 2 contiene los valores de la lluvia y temperatura medias mensuales (Est. Villa Ortúzar), con los que se elaboró la figura 2. De la comparación entre ambas variables, surge una evidente correspondencia de los meses más cálidos con los de mayor precipitación y de los más

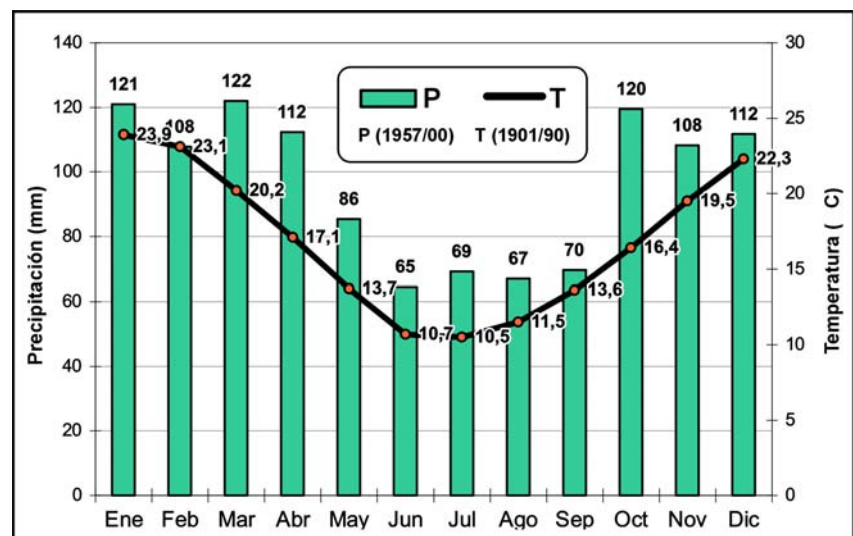


Figura 2

fríos con los menores registros, lo que indica el origen predominantemente local de la lluvia.

La figura 3 es el Climatograma de Knoch, que permite desarrollar la siguiente clasificación climática mensual de la ciudad de Buenos Aires:

mar, abr, oct y nov: **3 d (cálido – húmedo)**

ene, feb y dic: **3 c (cálido – seco - húmedo)**

may, jun, jul, ago y set: **2 d (templado – húmedo)**

6. BALANCE HÍDRICO

A nivel edáfico, se realizó mediante el programa Agroagua desarrollado por el Ing. Forte Lay, que asume

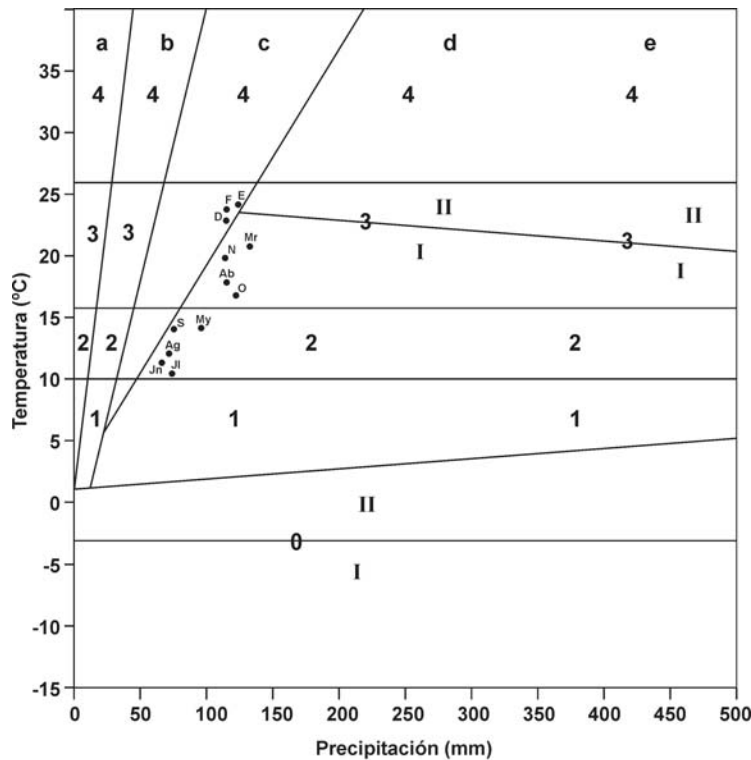
PRECIPITACIÓN MENSUAL

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total Anual
1957	117	52	15	92	192	80	62	40	12	73	64	142	941
1958	149	162	60	47	58	58	97	141	104	6	209	69	1160
1959	143	76	199	405	168	70	156	116	4	279	200	39	1855
1960	60	32	207	43	3	39	153	43	106	183	18	45	932
1961	198	97	71	95	133	37	48	36	32	114	116	142	1119
1962	84	75	62	177	17	13	85	51	105	20	126	102	917
1963	89	78	217	98	35	146	50	118	119	138	134	164	1386
1964	40	165	250	87	86	49	15	60	64	63	36	51	966
1965	91	102	34	142	13	65	59	67	50	21	133	85	862
1966	91	95	312	124	45	70	66	25	20	80	93	116	1137
1967	91	56	114	118	65	58	100	130	81	367	68	25	1273
1968	42	86	43	5	12	77	46	72	16	188	115	300	1002
1969	69	46	141	109	216	41	50	0	44	41	86	152	995
1970	123	79	109	125	76	50	68	78	87	147	38	57	1037
1971	294	240	77	58	57	58	91	37	139	78	45	116	1290
1972	47	37	105	27	36	179	56	89	90	97	101	146	1010
1973	142	162	163	123	20	126	114	2	2	124	51	35	1064
1974	287	62	135	16	60	12	88	77	62	35	51	40	925
1975	88	187	110	104	141	49	28	135	84	19	27	45	1017
1976	148	156	78	84	28	71	120	120	96	224	78	226	1429
1977	120	276	83	24	85	42	22	60	110	104	121	44	1091
1978	194	156	167	24	11	127	182	28	129	159	180	77	1434
1979	31	41	77	91	23	13	81	161	44	77	129	117	885
1980	87	107	138	218	134	95	93	49	48	83	156	80	1288
1981	155	75	90	54	206	55	47	19	77	68	144	89	1079
1982	36	177	108	57	86	100	78	15	209	146	47	88	1147
1983	95	62	61	54	37	34	12	99	68	160	88	168	938
1984	224	228	76	75	51	97	66	26	70	176	79	70	1238
1985	224	67	73	128	336	52	103	23	91	194	247	67	1605
1986	122	31	68	184	99	80	39	108	71	194	198	53	1247
1987	76	144	228	73	31	0	81	84	54	130	126	74	1101
1988	80	114	477	16	1	6	30	16	34	151	59	52	1036
1989	11	56	180	201	6	70	43	219	28	50	102	213	1179
1990	193	273	179	221	69	6	29	22	74	127	223	158	1574
1991	190	31	55	126	68	120	89	66	86	132	92	244	1299
1992	112	37	116	98	190	99	47	78	68	136	89	139	1209
1993	123	135	99	200	110	133	39	51	39	170	216	147	1462
1994	86	58	88	210	112	52	73	39	25	124	28	133	1028
1995	55	63	114	232	9	28	25	2	40	129	126	74	897
1996	49	105	26	142	33	9	22	67	121	99	124	129	926
1997	164	82	24	84	123	87	28	94	14	135	123	296	1254
1998	147	116	109	119	72	25	96	17	39	38	89	160	1027
1999	199	199	158	54	47	16	121	101	74	29	42	55	1095
2000	160	69	71	180	362	147	49	66	137	152	149	93	1635
Promedio	121	108	122	112	86	65	69	67	70	120	108	112	

**TEMPERATURA MEDIA
Villa Ortúzar (1901/90)**

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23,9	23,1	20,2	17,1	13,7	10,7	10,5	11,5	13,6	16,4	19,5	22,3

Tabla 2



Escala Térmica		Escala de Precipitación	
0	Frío I Glacial	a	Muy seco
	II Moderado	b	Seco
1	Subtemplado	c	Seco Húmedo
2	Templado	d	Húmedo
3	Cálido I Moderado	e	Muy Húmedo
	II Intenso		
4	Tórrido		

Figura 3

un paso diario y calcula la evapotranspiración potencial mediante la ecuación de Penman, pero siguiendo la metodología desarrollada por Thornthwaite y Mather (1957). Utilizando los valores medios del lapso considerado (1957/00) y adoptando una capacidad de campo de 250 mm, en función del tipo de suelo y la vegetación predominante, se tienen los siguientes valores medios anuales en mm:

- P=1.160 (100%)
- Evtp=1.075 (93%)
- Evtr=844 (73%)
- Ex=316 (27%) Df=231 (20%)

- P: precipitación
- Evtp: evapotranspiración potencial
- Evtr: evapotranspiración real
- Ex: exceso Df: déficit agrícola

En los espacios verdes alrededor

del 20% de la lluvia se transforma en infiltración; en el resto de la ciudad existe una fuerte limitación por impermeabilización.

Asumiendo esta premisa, la magnitud de la recarga del Acuífero Pampeano sería del orden de 9 hm³/a en los 38 km² de espacios verdes, mientras que la escorrentía rondaría 54 hm³/a. En la figura 1 se esquematiza el balance citado.

En la tabla 3 se vuelcan las variables que integran el balance hídrico edáfico, con un paso mensual, para el lapso 1957/00.

En la figura 4 se reproducen los promedios mensuales de P, Evtp y Evtr y en la figura 5 y en la tabla 4, los totales anuales de dichas variables.

En la primera se aprecia déficit hídrico (Evtp > P) de noviembre a febrero, con consumo de agua almacenada en el suelo sólo en noviembre y diciembre.

En la figura 5 aparecen lapsos relativamente prolongados con exceso hídrico (1984/94) y otros en los que predomina el déficit hídrico (1968/75), debido a los fenómenos de alternancia climática.

7. AGUA SUBTERRÁNEA

7.1. DINÁMICA

La interpretación que sigue se basa en el análisis del mapa 5 (flujo del Acuífero Puelche). La elaboración del mismo se sustenta en la medición de 44 niveles piezométricos, en otros tantos pozos, que fueron acota-

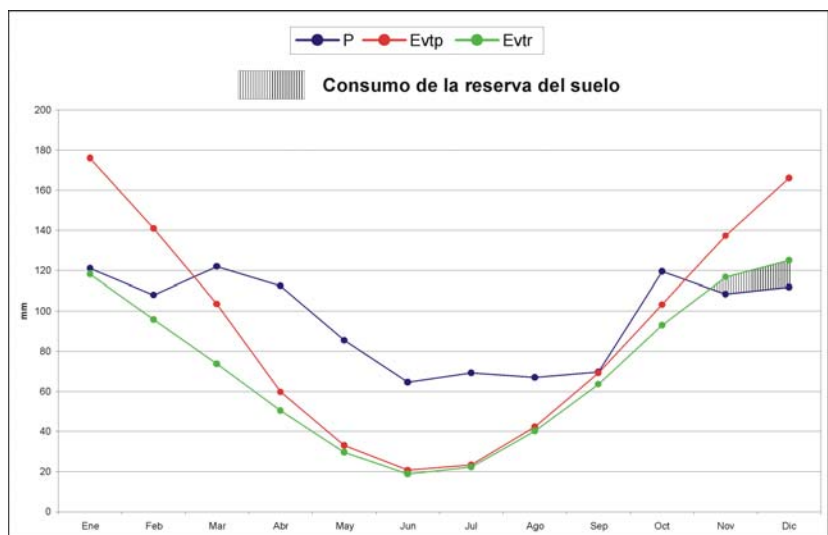


Figura 4

BALANCE HÍDRICO EDÁFICO (1957/00)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	121	108	122	112	86	65	69	67	70	120	108	112
Evtp	176	141	104	60	33	21	23	42	69	103	137	166
Evtr	118	96	74	50	30	19	22	40	64	93	117	125
Ex	6	16	21	30	45	60	43	31	21	31	19	12
Df	58	45	30	9	4	2	1	2	6	11	21	41

BALANCE HÍDRICO EDÁFICO (1991/00)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	129	90	86	145	113	72	59	58	64	114	108	147
Evtp	176	141	103	60	33	21	23	42	69	103	137	166
Evtr	130	102	68	51	31	19	23	40	64	94	119	132
Ex	9	19	1	27	70	50	37	17	26	17	18	21
Df	46	40	35	9	2	1	1	2	5	10	19	34

Tabla 3

BALANCE HÍDRICO EDÁFICO C.C. 250 mm

	mm				
	P	Evtp	Evtr	Ex	Df
1957	941	1074	694	150	383
1958	1160	1074	937	226	140
1959	1855	1074	902	988	174
1960	932	1079	736	235	346
1961	1119	1074	885	133	191
1962	917	1074	832	127	243
1963	1386	1074	895	1574	182
1964	966	1079	786	256	296
1965	862	1074	748	50	326
1966	1137	1074	860	279	216
1967	1273	1074	809	500	267
1968	1002	1079	714	174	365
1969	995	1074	793	242	284
1970	1037	1074	857	236	215
1971	1290	1074	906	354	169
1972	1010	1079	773	174	309
1973	1064	1074	855	330	221
1974	925	1074	813	109	261
1975	1017	1074	742	283	332
1976	1429	1079	881	400	231
1977	1091	1074	964	211	110
1978	1434	1074	930	474	145
1979	885	1074	628	103	281
1980	1288	1079	901	392	180
1981	1079	1074	877	204	198
1982	1147	1074	825	339	251
1983	938	1074	801	98	274
1984	1238	1079	964	368	118
1985	1605	1074	894	688	183
1986	1247	1074	846	401	230
1987	1101	1074	852	268	222
1988	1036	1079	755	300	327
1989	1179	1074	755	319	326
1990	1574	1074	1000	586	75
1991	1299	1074	911	341	167
1992	1209	1079	889	369	191
1993	1462	1074	955	495	119
1994	1028	1074	849	230	225
1995	897	1074	814	86	263
1996	926	1079	798	103	282
1997	1254	1074	911	291	168
1998	1027	1074	897	172	178
1999	1095	1074	863	331	213
2000	1635	1079	846	689	236
Prom.(1957/00)	1159	1075	844	334	230
Prom.(1991/00)	1183	1076	873	311	204

Tabla 4

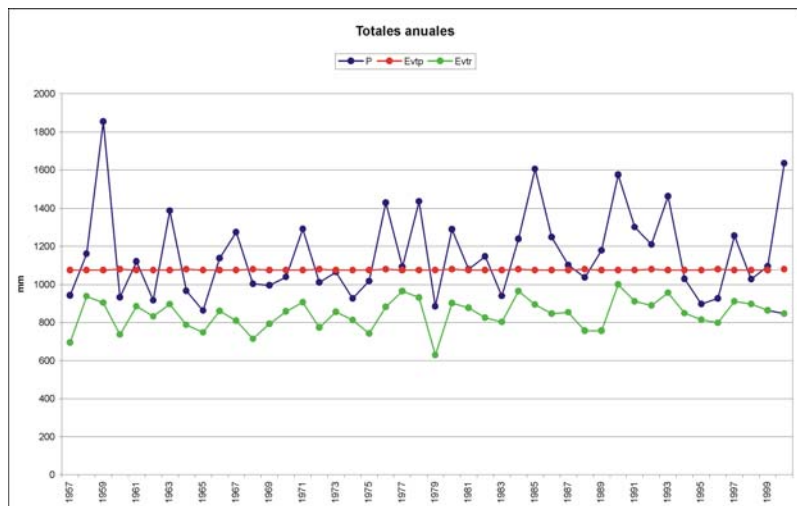


Figura 5

dos a partir de la carta topográfica 3557-7-3 Buenos Aires del IGM, a escala 1:50.000. Dado que la equidistancia de las isohipsas es 2,5 m, las curvas equipotenciales se trazaron con 5 m de separación, tabla 5.

Existe una distribución irregular de los puntos de medición, pues la ciudad de Buenos Aires se abastece con agua proveniente del Río de la Plata y por ello, los pozos son escasos y generalmente de difícil acceso, especialmente los privados. Un hueco notorio se aprecia en el sector E de la ciudad, a ambos lados de la Av. Rivadavia, desde su intersección con la Av. La Plata hasta los diques del puerto. La densidad y distribución general de los pozos, sin embargo, permite un trazado representativo de las líneas equipotenciales para la escala de trabajo original (1:50.000).

El flujo subterráneo dominante es hacia el NE y E (Río de la Plata), con una componente secundaria hacia el SE (Riachuelo), mapa 5.

Las mayores cotas hidráulicas se presentan en el borde O de la ciudad, con valores superiores a 15 m, culminando en el pozo 10 con 19,2 m. Desde este sector, que coincide con el tramo N-S de la Av. Gral. Paz, se aprecia una dirección dominante hacia el NE, con descarga hacia el Río de la Plata (pozos 2 y 3), con un gradiente hidráulico inicial (curvas 15 a 5 m) de 2,4 m/km y una disminución entre las equipotenciales de 5 y 0 m a 1,4 m/km, lo que le otorga a la superficie piezométrica un perfil hiperbólico.

Aproximadamente en el centro de la ciudad se aprecia un alto cerrado de 10 m, definido por el pozo 6 (13,3 m), que genera un flujo del tipo abanico hacia el NE, E y SE, pero con una marcada disminución del gradiente hidráulico hacia el E, pues entre las curvas de 5 y 0 m este registra sólo 0,8 m/km. En las dos primeras direcciones la descarga es hacia el Río de la Plata, pero al SE, el flujo se orienta hacia el Riachuelo.

Adoptando una permeabilidad y una porosidad efectiva medias de 25 m/d y 0,2 respectivamente, las velocidades extremas del flujo subterráneo son: 0,3 m/d para un gradiente hidráulico de $2,4 \cdot 10^{-3}$ y 0,1 m/d para $0,8 \cdot 10^{-3}$.

En relación a los caudales que atraviesan la sección coincidente con la equipotencial de 0 m, se pueden diferenciar 2 tramos. El que se ubica al NO del filete # II presenta un gradiente hidráulico medio (i) de $1,6 \cdot 10^{-3}$ y una longitud de la equipotencial de 0 de 7.150 m. El que está al SE de dicho filete, tiene un i de $7,9 \cdot 10^{-4}$ y una longitud de 10.600 m. Aplicando Darcy para ambos se tiene:

$$Q = T \cdot i \cdot L @ 9.900 \text{ m}^3/\text{d} @ 3,6 \text{ hm}^3/\text{a}$$

SECTOR	T	i	L	Q
	m ² /d		m	m ³ /d
NO	500	$1,6 \cdot 10^{-3}$	7.150	5.720
SE	500	$7,9 \cdot 10^{-4}$	10.600	4.190

En condición de flujo estacionario, dicho caudal es indicativo de la magnitud de la recarga y dado que el Acuífero Puelche se comporta como semiconfinado (no sufre variaciones en la reserva), cumple con la condición señalada.

7.2. MODELO NUMÉRICO

Con la información obtenida durante el relevamiento hidrogeológico urbano y la derivada de la recopilación, se elaboró un modelo numérico preliminar, sobre la base del programa original desarrollado por Mc Donald y Harbaugh (1988) del U.S. Geological Survey, ampliamente conocido como Modflow. Posteriormente dicho programa fue simplificado por Guiguer y Franz del Waterloo Hydrogeologic Inc y denominado Visual Modflow, cuya versión 2.8.2 es la que se utilizó en este trabajo.

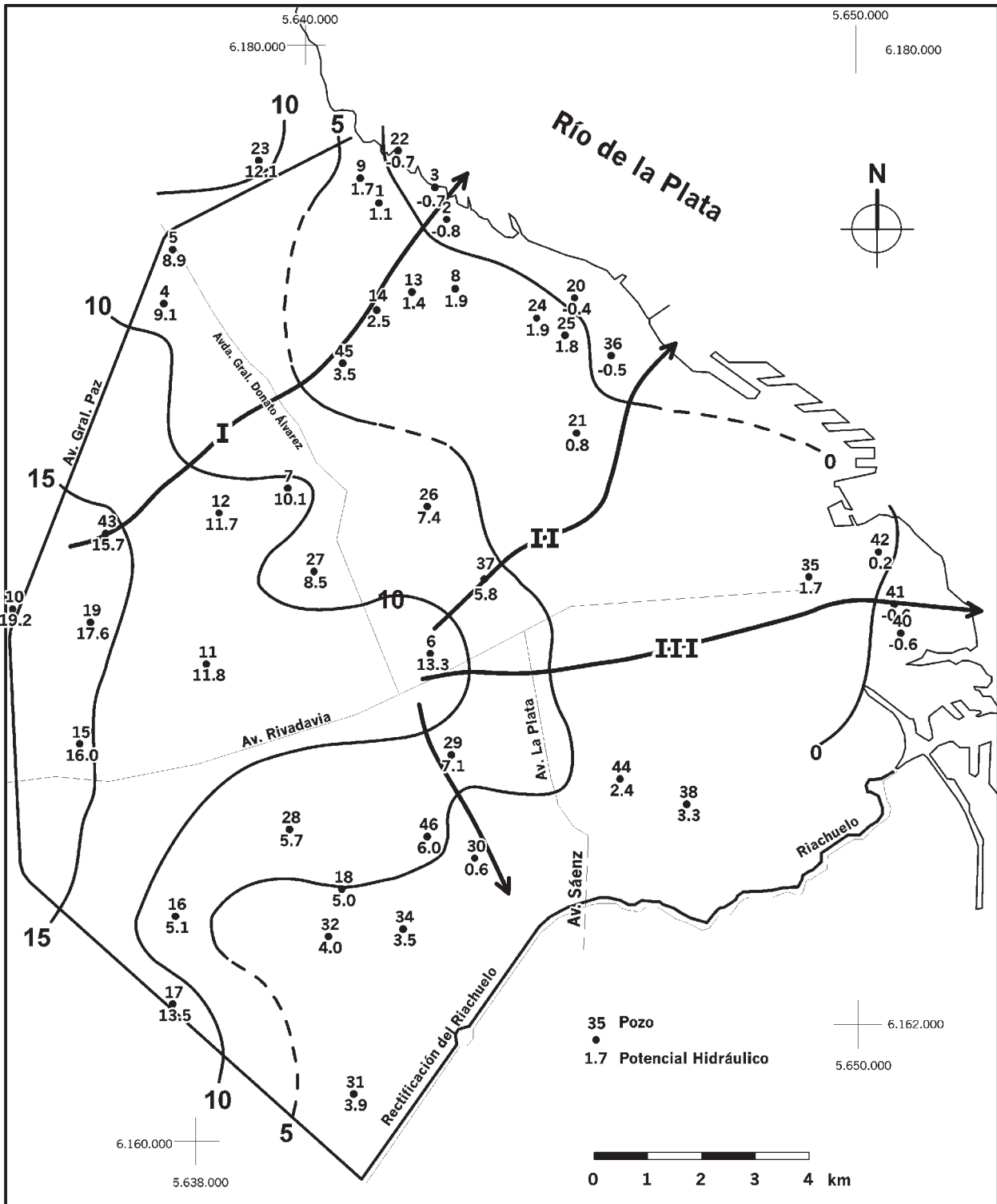
El modelo de flujo es de tipo tridimensional, se basa en el cálculo de diferencias finitas, y en este trabajo se lo ha desarrollado para un régimen permanente, que constituye la primera aproximación para el ajuste.

7.2.1. ESQUEMA CONCEPTUAL

El acuífero principal (Puelche) actúa como semiconfinado, dado que está cubierto por un limo arcilloso semiconfinante o acuitardo (Ensenadense basal). Se re-

COTAS HIDRÁULICAS - ANÁLISIS QUÍMICOS

Pozo	Coordenadas G. K.		Cota Hidrául. (m)	Cl- ppm	SO4= ppm	CO3H- ppm	CO3= ppm	NO3- ppm	ΣAn. (meq/l)	Na+ ppm	K+ ppm	Ca++ ppm	Mg++ ppm	ΣCat. (meq/l)	Na/Ca	icb Cl-(Na+K)/Cl	Res. Sec.	Alc. CO3Ca	Dureza CO3Ca	pH	C.E. µS/cm	RAS	Pozo										
	X	Y																															
1	6.176.950	5.641.500	1,1	70	2,0	134	2,8	387	8,4	0	0,0	56	0,9	12	205	8,9	11	0,3	11	0,6	25	2,1	12	15,6	-3,6	650	318	133	9,0	988	7,7	1	
2	6.176.800	5.642.800	-0,8	90	2,5	58	1,2	400	6,6	0	0,0	80	1,3	12	100	4,4	11	0,3	84	4,2	19	1,6	10	1,0	1,0	0,0	328	288	7,2	1020	2,8	2	
3	6.177.050	5.642.800	-0,7	80	1,7	58	1,2	277	4,5	0	0,0	5	0,08	7,5	98	4,3	7	0,2	12	0,6	21	1,8	6,8	11,7	9,0	675	4,0	3	117	9,0	675	4,0	3
4	6.175.200	5.637.700	9,1	53	1,5	77	1,6	371	6,1	0	0,0	110	1,8	11	177	7,7	8	0,2	12	0,6	18	1,5	10	12,8	4,3	680	304	105	7,4	1020	7,5	4	
5	6.176.200	5.637.850	8,9	53	1,5	72	1,5	426	7,0	0	0,0	103	1,7	12	181	7,9	9	0,2	17	0,9	28	2,3	11	9,1	-4,4	690	349	160	7,4	1060	6,2	5	
6	6.168.750	5.642.400	13,3	130	3,2	113	2	438	7,2	0	0,0	118	1,9	13	164	7,1	10	0,3	77	3,8	29	2,4	14	1,9	-1,3	790	360	313	7,2	1218	4,0	6	
7	6.171.750	5.639.800	10,1	50	1,4	58	1,2	431	7,1	0	0,0	66	1,1	11	95	4,1	9	0,2	73	3,6	28	2,3	10	1,1	-2,1	650	353	298	7,2	1005	2,4	7	
8	6.175.350	5.642.900	1,9	90	2,5	48	1,0	525	8,6	0	0,0	105	1,7	14	207	9,0	11	0,3	60	3,0	24	2,0	14	3,0	-2,7	840	431	250	7,3	1293	5,7	8	
9	6.177.350	5.641.250	1,7	60	1,7	77	1,6	538	8,8	13	0,4	53	0,9	13	242	11	8	0,2	15	0,7	20	1,7	13	14,2	-5,3	810	441	120	8,3	1250	9,8	9	
10	6.169.750	5.634.800	19,2	90	2,5	168	3,5	512	8,4	0	0,0	8	0,1	15	222	9,7	13	0,3	38	1,9	23	1,9	14	5,0	420	192	7,4	1362	7,0	10			
11	6.168.650	5.638.350	11,8	45	1,3	30	0,6	500	9,2	0	0,0	4	0,07	10	125	5,4	8	0,2	60	3,0	28	2,3	11	1,8	-3,9	560	410	265	7,3	950	3,3	11	
12	6.171.350	5.638.600	11,7	80	1,7	48	1,0	366	6,0	0	0,0	88	1,1	9,8	91	4,0	10	0,3	63	3,2	25	2,1	9,4	1,3	-1,5	550	300	281	7,3	850	2,4	12	
13	6.175.300	5.642.200	1,4	60	1,7	58	1,2	384	6,3	0	0,0	58	0,9	10	155	6,7	17	0,4	43	2,1	12	1,0	3,2	3,2	-3,2	650	315	155	8,0	1002	5,4	13	
14	6.175.000	5.641.450	2,5	60	1,7	58	1,2	436	7,2	0	0,0	51	0,8	11	152	6,6	15	0,4	53	2,7	11	0,9	11	2,5	-3,1	680	357	178	7,2	1013	4,9	14	
15	6.187.250	5.636.000	16,0	70	2,0	38	0,8	448	7,3	0	0,0	168	2,7	13	82	3,6	17	0,4	114	5,7	34	2,8	13	0,6	-1,0	810	367	428	7,6	1238	1,7	15	
16	6.164.100	5.637.700	5,1	110	3,1	38	0,8	512	8,4	0	0,0	130	2,1	14	149	6,5	17	0,4	108	5,4	27	2,3	15	1,2	-1,2	920	420	383	7,7	1413	3,3	16	
17	6.162.550	5.637.700	13,5	110	3,1	58	1,2	538	8,8	0	0,0	173	2,8	16	170	7,4	20	0,5	125	6,3	29	2,4	17	1,2	-1,5	980	441	433	7,6	1501	3,5	17	
18	6.164.550	5.640.800	5,0	280	7,3	326	6,8	589	9,7	0	0,0	20	0,3	24	238	10	50	1,3	171	8,5	46	3,8	24	1,2	-0,6	1510	483	617	7,7	2320	4,2	18	
19	6.169.350	5.636.250	17,6	40	1,1	19	0,4	474	7,8	0	0,0	40	0,6	9,9	71	3,1	16	0,4	73	3,6	28	2,4	9,5	0,9	-2,1	640	389	300	7,9	988	1,8	19	
20	6.175.100	5.645.050	-0,4	495	14	505	10,5	550	9,0	0	0,0	2	0,03	34	710	31	8	0,2	42	2,1	20,5	1,7	35	14,8	-1,2	2000	451	190	7,6	3080	22,5	20	
21	6.172.750	5.645.100	0,8	95	2,7	70	1,5	645	11	0	0,0	6	0,1	15	285	13	8	0,2	36	1,8	18	1,5	16	6,9	-3,7	880	529	165	7,5	1325	9,7	21	
22	6.177.900	5.642.000	-0,7	45	1,3	58	1,2	487	8,0	0	0,0	8	0,1	11	167	7,2	16	0,4	38	1,9	12	1,0	11	3,8	-5,0	610	389	144	7,2	930	6,0	22	
23	6.177.750	5.639.400	12,1	85	1,8	77	1,6	487	8,0	0	0,0	88	1,1	12	202	8,8	18	0,5	50	2,5	11	0,9	13	3,5	-4,1	780	389	170	7,5	1197	6,7	23	
24	6.174.800	5.644.400	1,9	301	8,5	288	5,6	487	8,0	0	0,0	63	1,0	23	402	17	19	0,5	68	3,4	21	1,8	23	5,2	-1,1	1420	389	257	7,8	2180	10,9	24	
25	6.174.550	5.644.950	1,8	270	7,6	384	8,0	525	8,6	0	0,0	9	0,1	24	470	20	17	0,4	43	2,1	14	1,2	24	9,6	-1,7	1630	430	165	8,0	2500	15,8	25	
26	6.171.400	5.642.400	7,4	65	1,9	55	1,1	495	8,1	0	0,0	6	0,1	11	135	5,9	8	0,2	64	3,2	28	2,3	12	1,8	-2,2	620	406	275	7,2	1045	3,6	26	
27	6.170.300	5.640.300	8,5	65	1,9	30	0,8	402	6,6	0	0,0	5	0,08	9,2	105	4,8	4	0,1	52	2,6	28	2,3	9,6	1,8	-1,5	620	330	245	7,2	900	2,9	27	
28	6.165.650	5.639.800	5,7	75	2,1	40	0,8	515	8,6	0	0,0	5	0,07	12	110	4,8	4	0,1	88	4,4	38	3,1	12	1,1	-1,3	630	422	375	7,3	1100	2,5	28	
29	6.166.100	5.642.750	7,1	57	1,5	55	1,1	490	8,0	0	0,0	4	0,07	11	165	7,2	8	0,2	58	2,9	14,5	1,2	12	2,5	-3,9	610	402	205	7,2	960	5,0	29	
30	6.165.100	5.643.100	0,6	190	5,3	330	6,9	830	14	0	0,0	6	0,1	26	460	20	28	0,7	78	3,9	35	2,9	28	5,1	-2,9	1550	680	340	7,6	2200	10,9	30	
31	6.160.850	5.640.900	3,9	370	11	305	6,4	490	8,0	0	0,0	3	0,05	25	450	20	24	0,6	60	3,0	41	3,4	27	6,5	-0,9	1500	402	320	7,4	2190	10,9	31	
32	6.163.750	5.640.550	4,0	125	3,5	120	2,5	565	9,3	0	0,0	4	0,07	15	250	11	8	0,2	56	2,9	28	2,3	16	3,8	-2,2	890	463	260	8,0	1460	6,8	32	
33	6.161.950	5.641.800	4,0	280	7,4	220	4,6	310	5,1	0	0,0	2	0,03	17	305	13	8	0,2	40	2,0	33	2,7	18	6,6	-0,8	1040	254	235	7,8	1870	9,6	33	
34	6.163.800	5.641.850	3,5	130	3,7	155	3,2	490	8,0	0	0,0	2	0,03	15	290	13	8	0,2	32	1,6	6	1,3	18	7,8	-2,4	900	402	145	7,4	1360	10,4	34	
35	6.170.150	5.648.300	1,7	280	7,3	85	1,8	640	11	0	0,0	8	0,1	20	310	14	12	0,3	70	3,5	42,5	3,5	21	3,9	-0,9	1100	525	350	7,2	2030	7,2	35	
36	6.174.050	5.645.800	-0,5	405	12	400	8,3	580	9,5	0	0,0	0	0,01	29	800	26	8	0,2	56	2,8	17	1,4	30	9,3	-1,3	1750	475	210	7,7	2670	17,9	36	
37	6.170.150	5.643.400	5,8	35	1,0	5	0,1	445	7,3	0	0,0	19	0,3	8,7	135	5,9	8	0,2	22	1,1	20,5	1,7	8,9	5,4	-5,1	450	365	140	7,5	705	5,0	37	
38	6.166.000	5.647.000	3,3	885	25	1250	26	1005	17	0	0,0	7	0,1	68	1090	48	70	1,8	188	1,4	142	11,7	62	33,9	-1,0	4180	824	1005	7,6	5360	18,8	38	
39	6.172.250	5.647.800	6,5	1,9	80	1,3	510	8,4	0	0,0	5	0,07	12	250	11	8	0,2	22	1,1	12	1,0	13	10,0	-4,9	710	418	105	7,7	1105	10,7	39		
40	6.169.100	5.650.900	-0,6	12690	358	1960	41	455	7,5	0	0,0	8	0,1	406	6555	285	125	3,2	900	45	980	79	412	6,3	0,2	24500	373	6200	8,9	31800	36,2	40	
41	6.169.700	5.650.800	-0,6	5540	156	1215	25	640	11	0	0,0	1	0,02	192	3450	150	45	1,2	320	16	76	6,3	173	9,4	0,03	11400	525	2225	7,3	16350	45,0	41	
42	6.170.750	5.650.500	0,2	4350	123	1110	23	700	12	0	0,0	1	0,01	157	2875	125	39	1,0	250	13	255	2,1	160	10,0	-0,03	9250	574	1675	7,3	12650	30,5	42	
43	6.171.000	5.636.550	15,7	85	1,9	40	0,8	540	8,9	0	0,0	20	0,3	12	140	6,0	8	0,2	86	4,3	22	1,8	12	1,4	-2,3	630	443	305	7,3	950	3,4	43	
44	6.166.450	5.645.700	2,4	75	2,1	105	2,2	565	9,3	0	0,0	8	0,1	14	255	11	8	0,2	32	1,6	18	1,5	14	6,9	-4,3	790	4						



Mapa 5 - FLUJO SUBTERRÁNEO

carga desde el Pampeano sobrepuesto, en aquellos sitios donde su potencial hidráulico es menor al del Pampeano y se descarga en éste, donde su potencial hidráulico es mayor, en ambos casos por filtración vertical descendente y ascendente (Auge,1986).

El Acuífero Pampeano, que contiene a la capa freática, se recarga por infiltración de la lluvia en aquellos lugares que carecen de impermeabilización artificial (espacios verdes). También recibe un importante aporte por pérdidas de las tuberías subterráneas, particularmente de las que conducen agua potable. Esta recarga artificial es de difícil cuantificación, pero en megalópolis como Buenos Aires suele superar el 30% de agua circulante.

7.2.2. DEFINICIÓN AREAL

La superficie modelada está incluida en un área rectangular, delimitada por las coordenadas Gauss Krüger, **Y** mín: 6.158.200, **Y** máx: 6.178.200, **X** mín: 5.633.000 y **X** máx: 5.653.000. Dicha superficie fue discretizada usando una grilla de diferencias finitas compuesta por 80 filas y 80 columnas que determinan 6.400 celdas cuadradas de 250 m de lado cada una (0,0625 km²), generando un área total de 400 km². La discretización resultante se presenta en la figura 6. En dicha figura las celdas blancas o activas (3.385), que cubren 211,6 km², son las únicas en las que se considera flujo subterráneo, mientras que las verdes actúan como inactivas.

En sentido vertical el sistema fue discretizado en tres capas o “layers” a los efectos de representar las principales unidades hidrogeológicas. Estas capas son asignadas a la secuencia estratigráfica del Pampeano-Postpampeano, al Puelche y también al acuitardo como

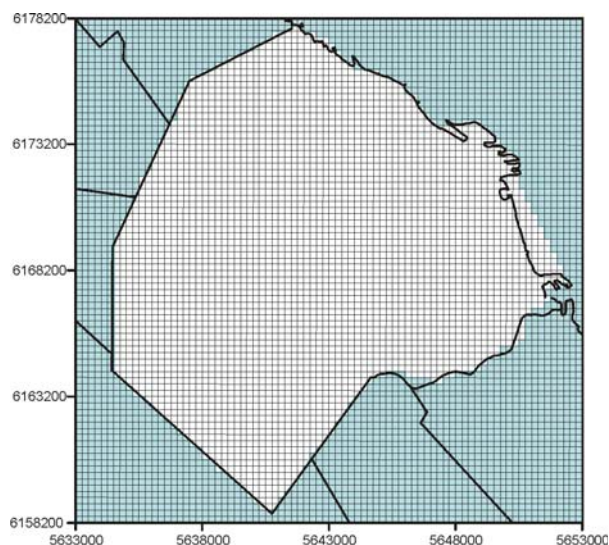


Figura 6

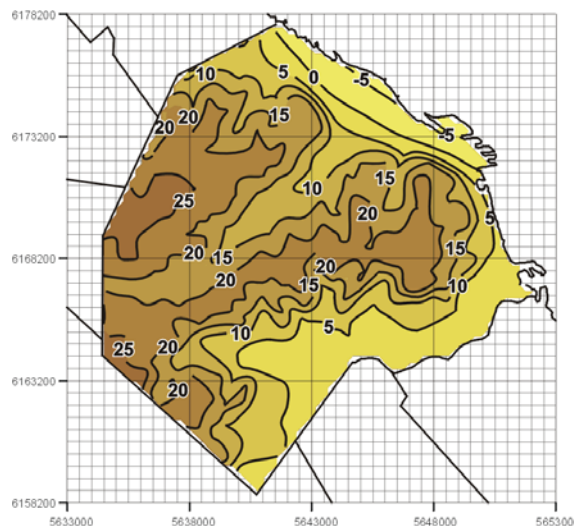


Figura 7

layer intermedio, de acuerdo a lo establecido en el esquema conceptual.

La interfase entre las distintas capas del ModFlow fue obtenida por la generación de cuatro superficies: Topografía (techo del layer 1 – figura 7), Techo del Acuitardo (techo del layer 2 – figura 8), Techo del Puelche (base del layer 2 – figura 9) y Piso del Puelche (base del layer 3 – figura 10).

Los mapas de las figuras 9 y 10 coinciden con los estructurales del techo y piso del Puelche (mapas 2 y 3), que indican una suave profundización de ambas superficies estratigráficas hacia el Río de la Plata. En la figura 11 se representa un perfil siguiendo la traza de la fila 21 de la grilla.

Para la definición de la geometría del sistema y las condiciones generales de borde se adoptaron, en esta primera aproximación del modelo, celdas de carga hidráulica constante.

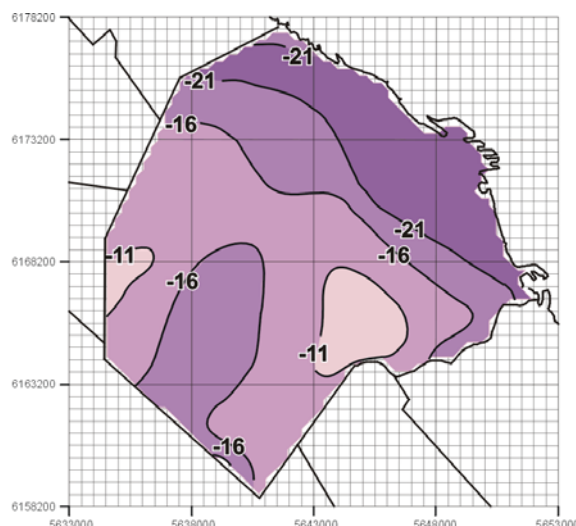


Figura 8

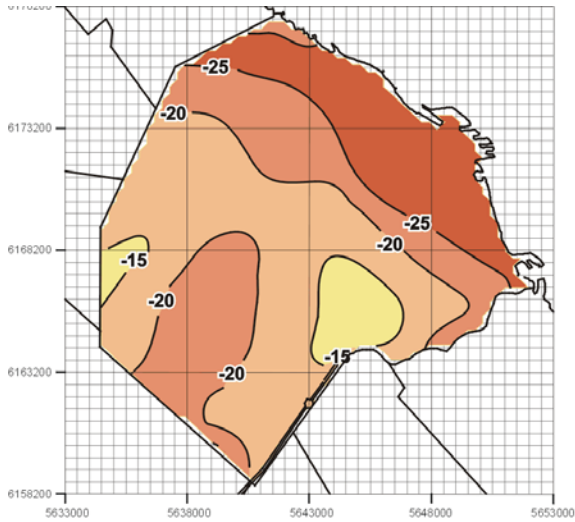


Figura 9

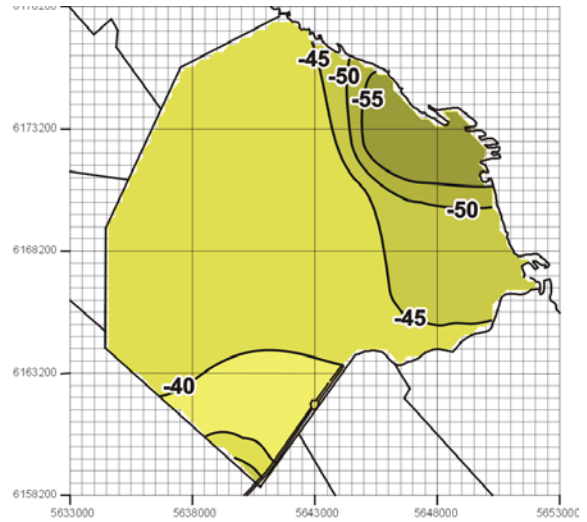


Figura 10

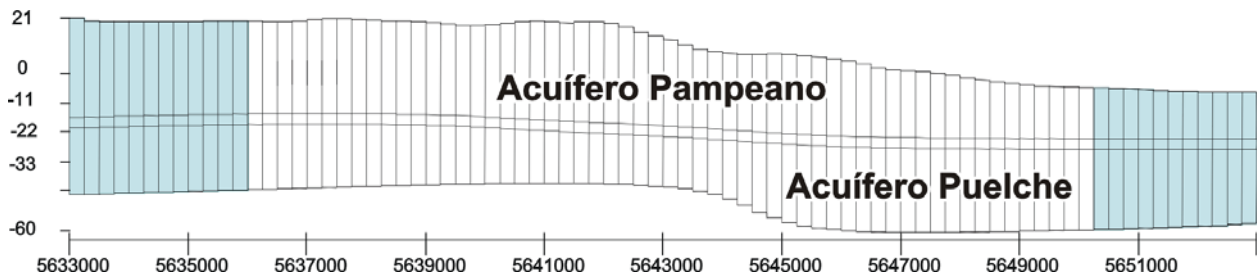


Figura 11

7.2.3. MÓDULOS DE ENTRADA

Las condiciones piezométricas iniciales, se obtuvieron de las profundidades del nivel de agua medidas en 44 pozos terminados en el Acuífero Puelche.

Dichas profundidades fueron transformadas en cotas hidráulicas, mediante la vinculación a la cota topográfica.

Con las cotas hidráulicas se elaboró el mapa con la piezometría medida del Acuífero Puelche (figura 12). Siguiendo el mismo procedimiento se confeccionó el mapa con la freaticimetría medida del Acuífero Pampeano (figura 13).

Se utilizaron los módulos de recarga y evapotranspiración del Visual ModFlow para simular las entradas y las salidas de agua en los acuíferos. Dado que el

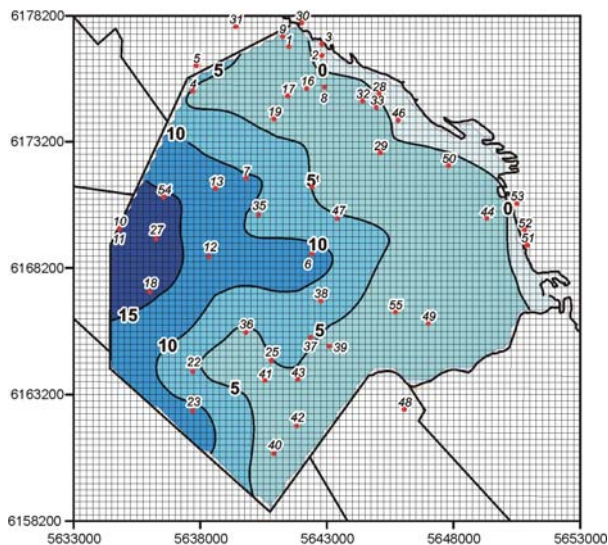


Figura 12

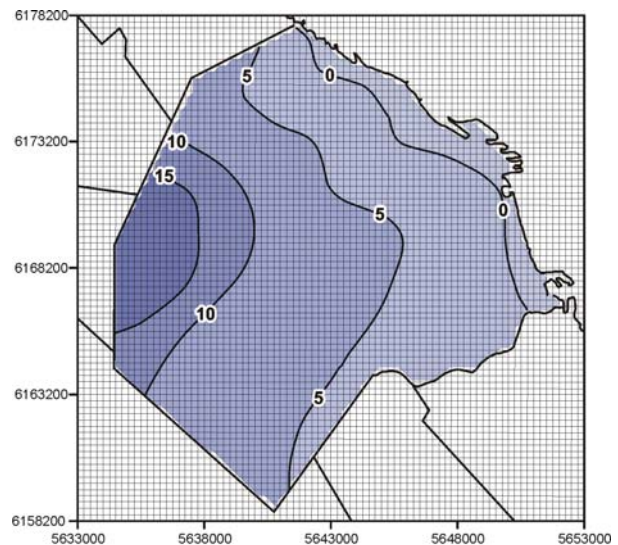


Figura 13

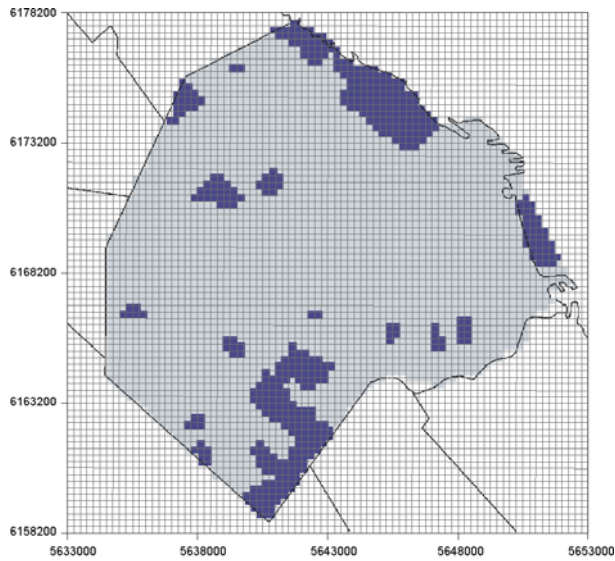


Figura 14

módulo de evapotranspiración del ModFlow considera: la superficie de evapotranspiración, la tasa potencial de evapotranspiración y la profundidad de extinción, se creyó conveniente en este modelo preliminar, aplicar una evapotranspiración potencial calculada en 1.074 mm/año y una profundidad de atenuación de 1,5 m. Estos valores surgen del balance hídrico a nivel edáfico para el año 1999 de la Estación Villa Ortúzar del Servicio Meteorológico Nacional, ya que este año representa valores de precipitación (1.094 mm) equivalentes a la media.

Del balance hídrico se obtiene un exceso de 381 mm/a, parte del cual se transformará en recarga del Acuífero Pam-

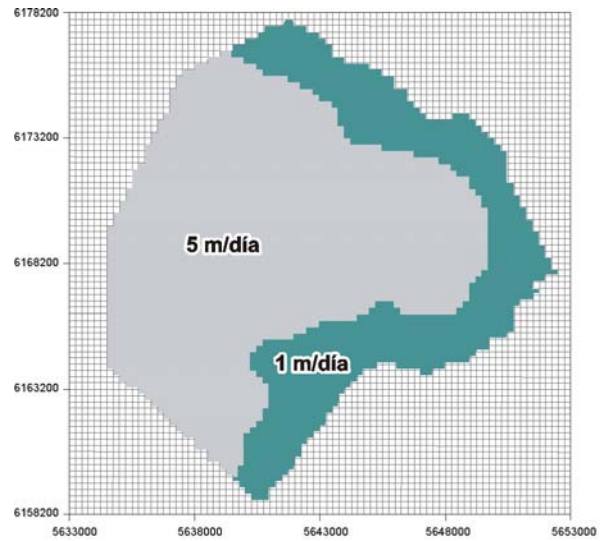


Figura 15

peano y el resto en escorrentía. En la figura 14 se indican los espacios verdes que permitieron determinar las 466 celdas sujetas a recarga por infiltración.

7.2.4. RESULTADOS PRELIMINARES DEL AJUSTE

En las figuras 15 y 16 se observa la distribución de las áreas con diferentes coeficientes de permeabilidad para cada acuífero (layers 1 y 3), resultantes de las corridas de calibración preliminar del modelo.

Existe correspondencia entre los valores más elevados de permeabilidad y los mayores porcentajes de arena

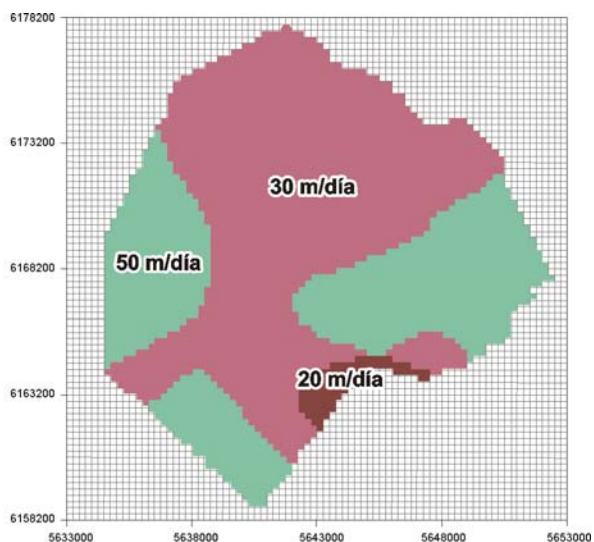


Figura 16

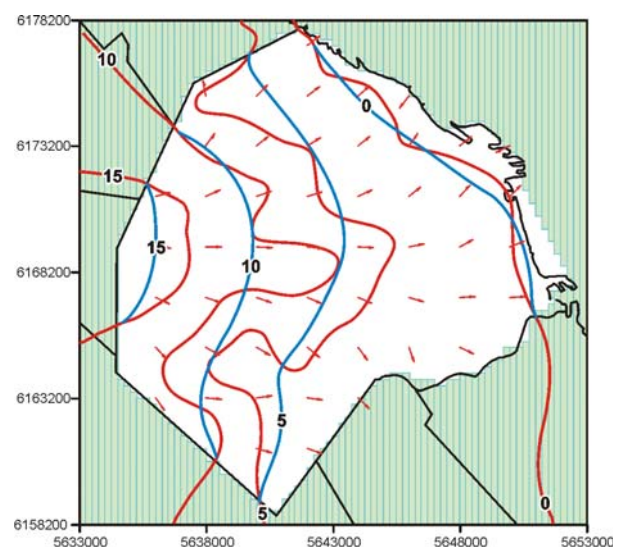


Figura 17

en el Acuífero Puelche (mapa 4). Para el acuitardo del layer 2 se asignó una permeabilidad ($K_x=K_y=0,02$ m/día y $K_v=0,002$ m/día).

El modelo se adaptó a una condición de régimen permanente; es decir el volumen de entrada es equivalente al de salida en las celdas activas. En consecuencia, en las ecuaciones de flujo, no interviene el tiempo ni tampoco el coeficiente de almacenamiento. El régimen de flujo permanente, es el que se emplea normalmente para la calibración inicial de un modelo. En este caso la calibración se aplicó a los volúmenes de agua entrantes y salientes y a las permeabilidades hidráulicas (K) del sistema.

A los efectos de la calibración de todo modelo, el factor de control esencial, es la comparación de los potenciales hidráulicos calculados con los medidos. Por lo tanto, es imprescindible contar con una base de datos confiable de niveles freáticos y piezométricos y con la distribución areal de las isolíneas correspondientes. La figura 17 demuestra una correspondencia aceptable entre los niveles piezométricos medidos en el Acuífero Puelche (rojo) y los calculados (fucsia), con una equidistancia de 5 m entre curvas extremas de 15 y 0m.

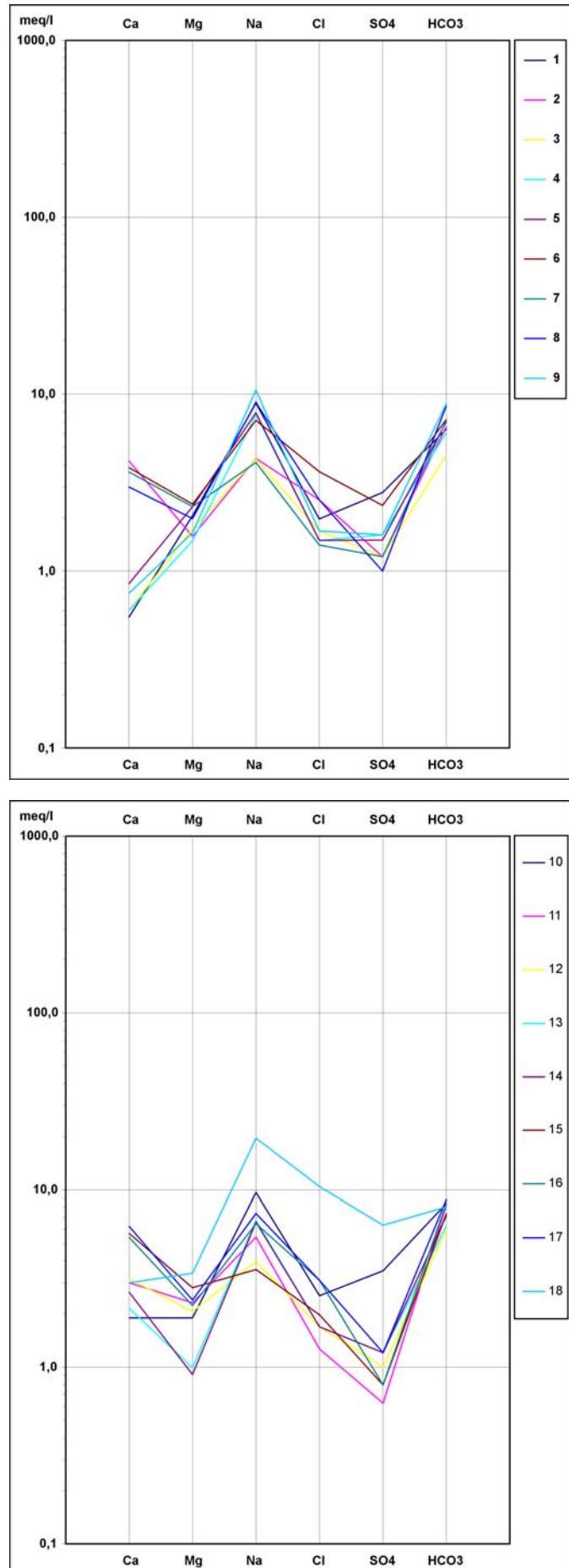
Para lograr un buen control de calibración, se utilizaron 24 puntos de medición seleccionados; en el mapa se representan también los vectores que indican la dirección y sentido del flujo subterráneo.

Para el método de resolución de las ecuaciones se utilizó SIP Solver del Visual ModFlow (Strongly Implicit Procedure Package), con un criterio de convergencia de 0,01 m. El grado de ajuste es evaluado a través del análisis de residuos, llegando a una raíz del error cuadrado promedio normalizado del 10%.

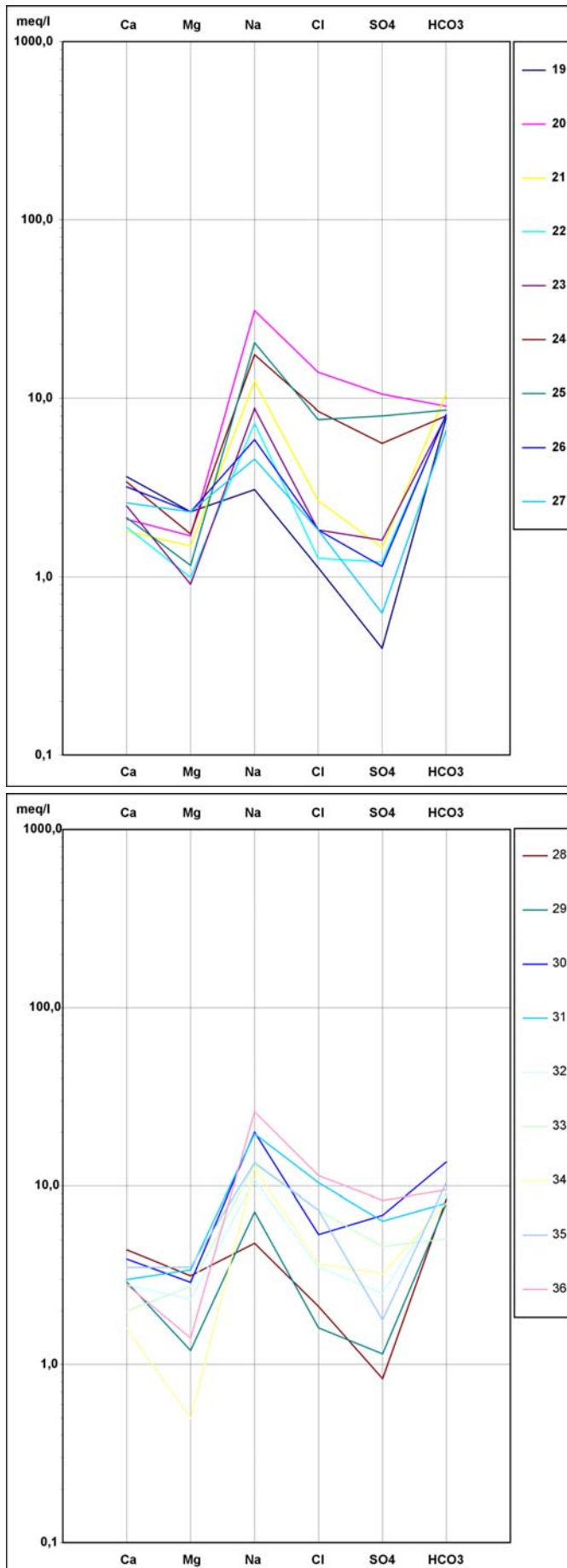
7.3. QUÍMICA

Existe un marcado predominio del tipo bicarbonatado en el agua del Acuífero Puelche, con 36 muestras sobre 44 analizadas (82%); 7 muestras son cloruradas y sólo 1 sulfatada. El agua clorurada se emplaza en la Terraza Baja, donde el Cl promedia 210 meq/l en los pozos 40,41 y 42. En la Terraza Alta el agua es bicarbonatada con una media de 8 meq/l.

En las figuras 18 a 22 se representa la composición química de las 44 muestras de acuerdo a la metodología de Schoeller (1935) y en las figuras



Figuras 18 y 19



Figuras 20 y 21

23 a 27, de acuerdo al método ideado por Piper (1944).

El agua clorurada sódica con alto tenor salino de la Terraza Baja, es producto de las intrusiones marinas del Holoceno. El acceso de agua marina al Acuífero Puelche, se facilitó en aquellos sitios donde el Pampeano fue totalmente erosionado y el Puelche contacta directamente con el Postpampeano (cuenca del Río Matanza).

7.3.1. CLORUROS

Los cloruros naturales provienen de la evaporación del agua marina y de su retorno a tierra firme arrastrados por la lluvia, especialmente en ámbitos costeros. Otra fuente es la infiltración en salinas, salares y su entorno, donde también se produce arrastre por las gotas de lluvia. Los sedimentos de origen marino suelen contener agua con altas concentraciones de Cl⁻.

En lo referente a actividades antrópicas, los lixiviados de los basurales presentan altos tenores en cloruros, formando plumas de contaminación que pueden emplearse para medir la velocidad del flujo subterráneo.

El Cl⁻ tiene un alto índice de solubilidad y como no reacciona con el componente sólido ni con el agua y no sufre procesos de oxidación ni reducción, se lo suele emplear como trazador natural.

En el mapa 6 se indica la variación espacial en el contenido de Cl⁻ y en ella se aprecia que el sector occidental de la ciudad presenta tenores inferiores a 100 ppm (2,8 meq/l). Sólo en el sector SE (vecindad del Riachuelo) y en un ámbito reducido al N (pozos 20,24,25 y 36) los Cl⁻ superan 250 ppm (7 meq/l), que es el límite de potabilidad adoptado por el Marco Regulatorio Decreto 999/92 para Aguas Argentinas (tablas 6a y 6b de frecuencia y calidad de muestreo).

En el ámbito ribereño de la Reserva Ecológica (pozos 40,41 y 42), los Cl⁻ se incrementan bruscamente hasta alcanzar 12.690 ppm (358 meq/l - pozo 40), en coincidencia con la erosión del Pampeano y la acumulación del Postpampeano de origen marino sobre el Puelche.

Los contenidos extremos son 35 (0,9 meq/l - pozo 37) y 12.690 ppm (357 meq/l - pozo 40), con un promedio de 145 ppm (4,1 meq/l). Dicho promedio no incluye a los pozos 40,41 y 42, debido a que presentan tenores excesivamente elevados prácticamente en la totalidad de las sustancias analizadas. Por ello, tampoco se consideran los contenidos de los

Sistema y frecuencia de extracción de muestras

Tipos de aguas	Parámetros	Frecuencia
Agua cruda de toma superficial	Plaguicida	Trimestral
	Análisis químicos + DBO + OC + hidrocarburos + fenoles	Cuatrimestral
	Análisis químicos + metales pesados + fenoles + hidrocarburos + detergentes	Mensuales
	Análisis bacteriológico	Diario
	Datos básicos: pH, turbiedad, alcalinidad.	Cada 2 horas
Agua cruda de toma subterránea	Análisis químico	Semestral
	Análisis bacteriológico	Trimestral
Agua potabilizada en la salida de establecimiento potabilizador	Datos básicos: pH, turbiedad, alcalinidad.	Cada 2 horas
	Análisis bacteriológico	Cada 2 horas
	Análisis químicos + DBO + OC + hidrocarburos + fenoles + metales pesados	Mensual
Agua potabilizada en el sistema de distribución	Análisis bacteriológico	Mensual c/10000 hab. en el radio de agua y cloaca (1)
	Análisis químicos	(2)

1) Los puntos de muestreo en red se dividirán en fijos (escuelas, hospitales, oficinas públicas) y variables que cubran proporcionalmente toda el área servida.

(2) En todas las oportunidades en que se efectúen análisis bacteriológicos se medirá Cloro Residual. En un 20% de las muestras se medirán, además, turbiedad, pH, dureza, residuo conductimétrico, amoníaco, nitritos, nitratos, hierro, manganeso, etc.

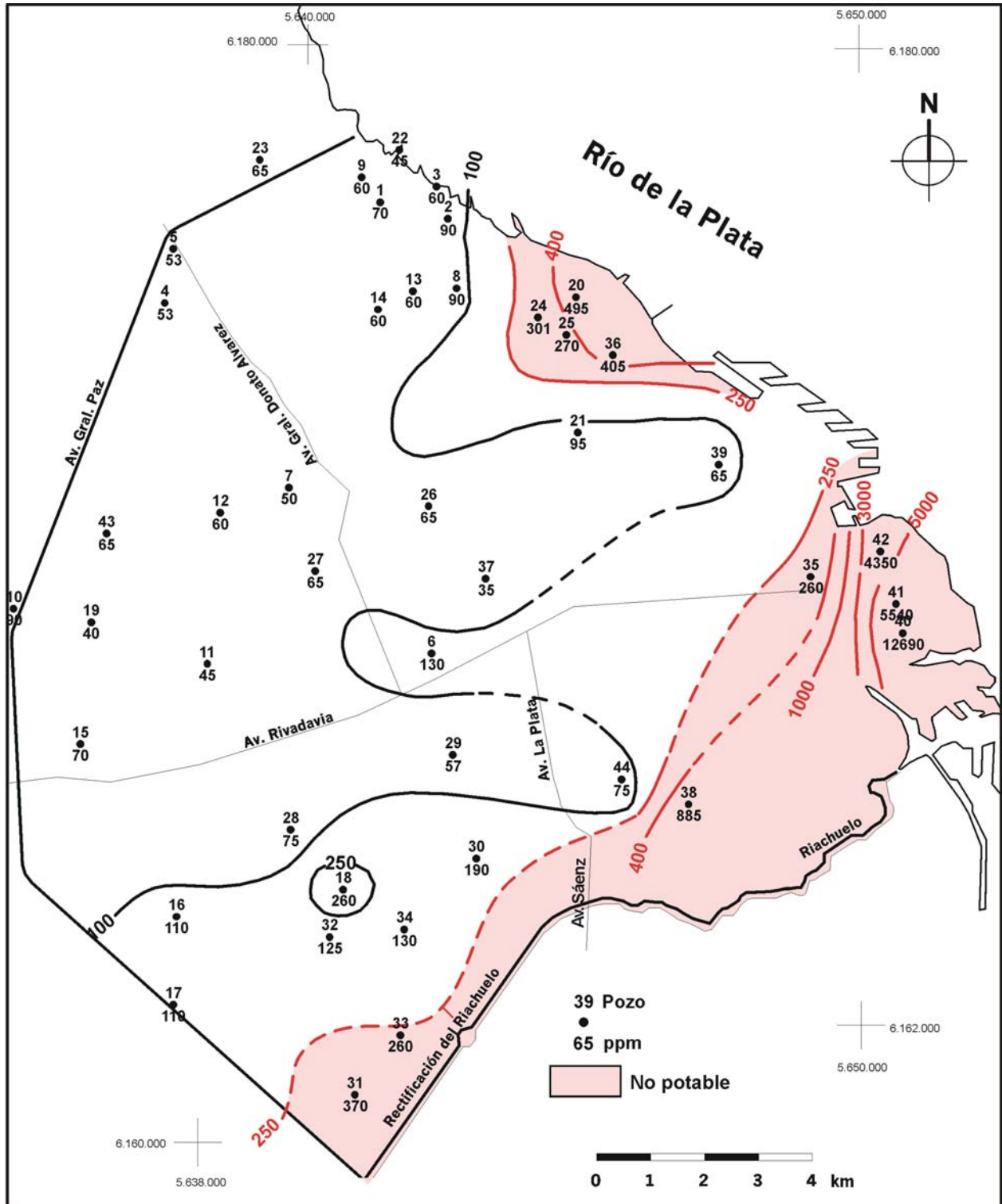
Tabla 6a

NORMAS MINIMAS DE CALIDAD DE AGUA LIBRADA AL SERVICIO

Parámetros	Unidad	Metas		
		1993	1998	2003
1- Características Físicas				
Color		12	10	10
Olor y Sabor		no objetable	<1,0	<1,0
Turbiedad (4)	NTU	<3,0		
2- Características Químicas				
2.1. Sustancias inorgánicas				
Alcalinidad total (CO ₃ Ca)		400	400	400
Aluminio residual (Al ³⁺)	mg/l	0,2	0,2	0,2
Arsénico (As)	mg/l	0,05	0,05	0,05
Cadmio (Cd)	mg/l	0,005	0,005	0,005
Cianuro (CN ⁻)	mg/l	0,10	0,10	0,10
Cloro activo (l)	mg/l	0,2-0,5	0,2-0,5	0,2-0,5
Cloruros (Cl ⁻)	mg/l	700	250	250
Cobre (Cu)	mg/l	1,0	1,0	1,0
Cromo (Cr)	mg/l	0,050	0,050	0,050
Dureza total (CO ₃ Ca)	mg/l	400	400	400
Fluoruro (F ⁻) (2)	mg/l	2,0	2,0	2,0
Hierro Total (Fe)	mg/l	0,30	0,20	0,10
Manganeso (Mn)	mg/l	0,10	0,05	<0,05
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001	0,001	0,001
Nitrato (NO ₃ ⁻) (3)	mg/l	45	45	45
pH (Pozos)		6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5
pH (Plantas) (5)		pH _s ± 1,0	pH _s ± 1,0	pH _s ± 1,0
Plomo (Pb)	mg/l	0,050	0,010	0,010
Selenio (Se)	mg/l	0,010	0,010	0,010
Sólidos disueltos totales	mg/l	1500	1500	1000
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/l	400	400	200
Zinc (Zn)	mg/l	5	5	5
2.2. Sustancias Orgánicas				
THM	µg/l	100	100	50
Aldrin + Dieldrin	µg/l	0,03	0,03	0,03
Clordano	µg/l	0,1	0,1	0,1
DDT (total isómeros)	µg/l	1	1	1
Detergentes	mg/l	0,50	0,50	0,50
Heptacloro y Heptacloroepóxido	µg/l	0,1	0,1	0,1
Lindano	µg/l	3	3	3
Metoxicloro	µg/l	30	30	30
2,4 D	µg/l	100	100	100
Benceno	µg/l	10	10	10
Hexacloro benceno	µg/l	0,01	0,01	0,01
Monocloro benceno	mg/l	0,003	0,003	0,003
1,2 Dicloro benceno	mg/l	0,0003	0,0003	0,0003
1,4 Dicloro benceno	mg/l	0,0001	0,0001	0,0001
Clorofenoles	µg/l	1	1	1
Tetradoruro de Carbono	µg/l	3	3	3
1,1 Dicloroetano	µg/l	-	0,3	0,3
Tricloroetano	µg/l	20	20	20
1,2 Dicloroetano	µg/l	-	10	10
1,1,1 Tricloroetano	µg/l	-	200	200
Cloruro de Vinilo	µg/l	2	2	2
Benzopireno	µg/l	-	0,01	0,01
3. Características Bacteriológicas				
Bacterias Aeróbicas (Agar 37 °C 24hs)	UFC/ml	100	100	100
Bacterias Coliformes (a 37 °C) (Caldo Mc Conkey o verde brillante)	NMP/100ml	<2	<2	<2
Escherichia Coli	U/ml	no debe contener	no debe contener	no debe contener
Pseudomonas aeruginosas	U/100ml	no debe contener	no debe contener	no debe contener

- (1) Sujeto a la necesidad de calidad bacteriológica en el punto de suministro al usuario.
- (2) En caso de fluorar, el Ministerio de salud y Acción Social debe establecer las concentraciones a usar.
- (3) En los casos en que no se pueda suministrar agua con un contenido menor de nitratos, el Ministerio de salud y Acción Social debe autorizar el abastecimiento, pues los problemas que se derivarían de la falta de agua son evidentemente mayores. Además debe advertirse a la población sobre no usar esa agua para la preparación de la alimentación del lactante.
- (4) 95% del tiempo.
- (5) 90% del tiempo. El concesionario debe asegurar el suministro de agua no agresiva ni incrustante al sistema de distribución.

Tabla 6b



Mapa 6 - CLORUROS

pozos 40,41 y 42, en el cálculo de los promedios del resto de los iones.

En general existe coincidencia entre la dirección del flujo subterráneo y el aumento en el contenido de Cl, aunque localmente se aprecian algunas desviaciones como el caso del pozo 10, que es el que tiene mayor potencial hidráulico y 90 ppm de Cl (2,5 meq/l), o el del pozo 22 en la ribera del Río de la Plata con 45 ppm (1,3 meq/l). El brusco aumento que se produce en al Terraza Baja, no es producto del incremento de los Cl en la dirección del flujo, sino de la contaminación natural con agua de mar.

En lo referente a potabilidad, la mayor parte del área estudiada tiene menos de 250 ppm de Cl⁻ (7,0 meq/l) y por lo tanto es agua apta para consumo humano respecto a dicho ión.

7.3.2. SULFATOS

Su origen natural más frecuente es la disolución del yeso y la anhidrita, o la oxidación de sulfuros. El lixiviado de los basurales, el SO₂ atmosférico eliminado con los humos industriales y la fertilización del suelo, con sulfato de amonio, constituyen fuentes importantes de contaminación con SO₄⁼ en el agua subterránea.

Los contenidos extremos de SO₄⁼ son 5 ppm (0,1 meq/l - pozo 37) y 1.960 ppm (41 meq/l - pozo 40) y el promedio 150 ppm (3,1 meq/l).

En el mapa 7 se observa un predominio notorio de tenores menores a 200 ppm de SO₄⁼ (4,2 meq/l) en el Acuífero Puelche, situación que también se da para concentraciones menores a 100 ppm (2,1 meq/l). Siguiendo la tendencia mencionada para los Cl⁻, los contenidos en SO₄ aumentan en el sentido del flujo subterráneo, aunque con algunas excepciones como sucede con los Cl⁻. Vuelven a presentarse los 2 sectores con tenores elevados; el N vecino a la ribera del Río de la Plata (pozos 20 y 36) y el SE, en la vecindad del Riachuelo, culminando en el pozo 40 con 1.960 ppm.

Considerando la norma de potabilidad establecida por el Decreto 999/92 (400 ppm – 8,3 meq/l), sólo esos 2 sectores (N y SE) tienen aguas inaptas para consumo humano respecto a SO₄⁼.

7.3.3. ALCALINIDAD

Es la propiedad que inhibe la actividad de los ácidos en el agua. La alcalinidad deriva de la presencia de bicarbonatos y de carbonatos, pero estos últimos sólo son solubles con pH mayores a 8,2, por lo que en las aguas naturales predominan ampliamente los CO₃H.

El aporte más importante de CO₃H⁻ al agua subterránea deriva de la combinación del H₂O con el CO₂ en la franja edáfica de la zona subsaturada:



En dicha franja existe una alta presión de CO₂ debido a la actividad biológica, particularmente en los suelos con un buen desarrollo del horizonte A.

La otra fuente, es la disolución del CO₃Ca (calcita):



En el mapa 8 se observa una distribución bastante irregular de los contenidos en CO₃H⁻, con valores expresados en CO₃Ca menores a 400 ppm (8 meq/l) en el sector O de la ciudad, salvo los pozos 10 y 43 y un leve incremento, hasta superar 800 ppm 16 meq/l) en el sector SE (pozo 38). Los pozos de la Reserva Ecológica presentan alcalinidades contestes con el resto y en el # 40, que es el que registra mayor salinidad total se determinó sólo 373 ppm de CO₃H⁻ (7,5 meq/l).

Los extremos de alcalinidad como CO₃Ca son 227 ppm (4,5 meq/l - pozo 3) y 824 ppm (16,5 meq/l - pozo 38) y el promedio es 412 ppm (8,2 meq/l).

Siguiendo la norma establecida en el Decreto 999/92 (tabla 5b), se resaltó el ámbito con más de 400 ppm (8 meq/l de alcalinidad expresada como CO₃Ca). La región con agua no potable ocupa una extensión considerable, pero teniendo en cuenta que no se conocen afectaciones a la salud por la ingesta de aguas alcalinas, la limitación impuesta al contenido en CO₃H⁻ (400 ppm) aparece como exagerada.

7.3.4. RESIDUO SECO (RS)

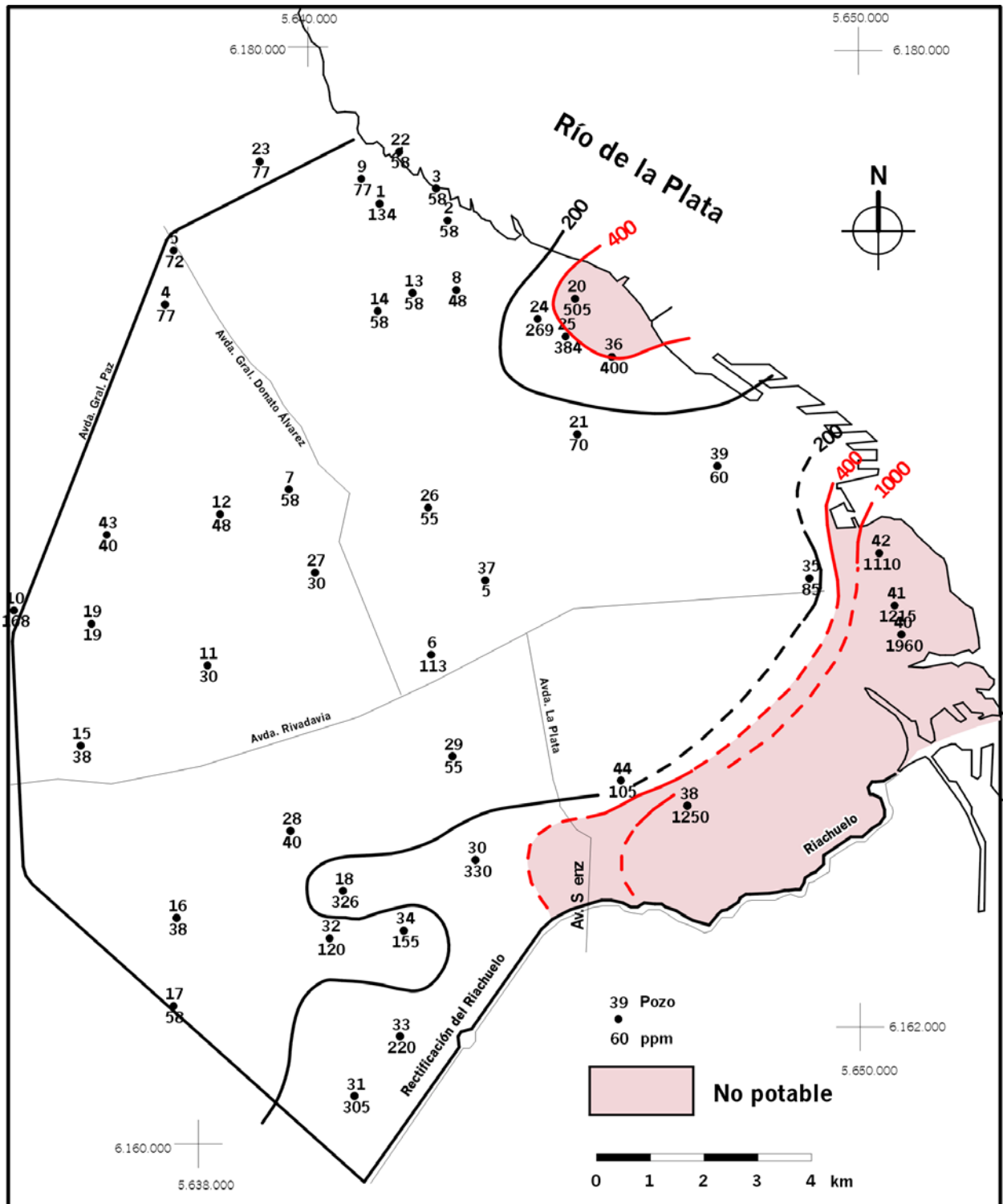
También denominado salinidad total (ST) o sólidos disueltos totales (SDT) es un factor trascendente, pues prácticamente todas las normas vigentes en el mundo, lo consideran como uno de los limitantes de la potabilidad.

El Decreto 999/92, fija un límite de 1.500 mg/l para la potabilidad respecto a (SDT).

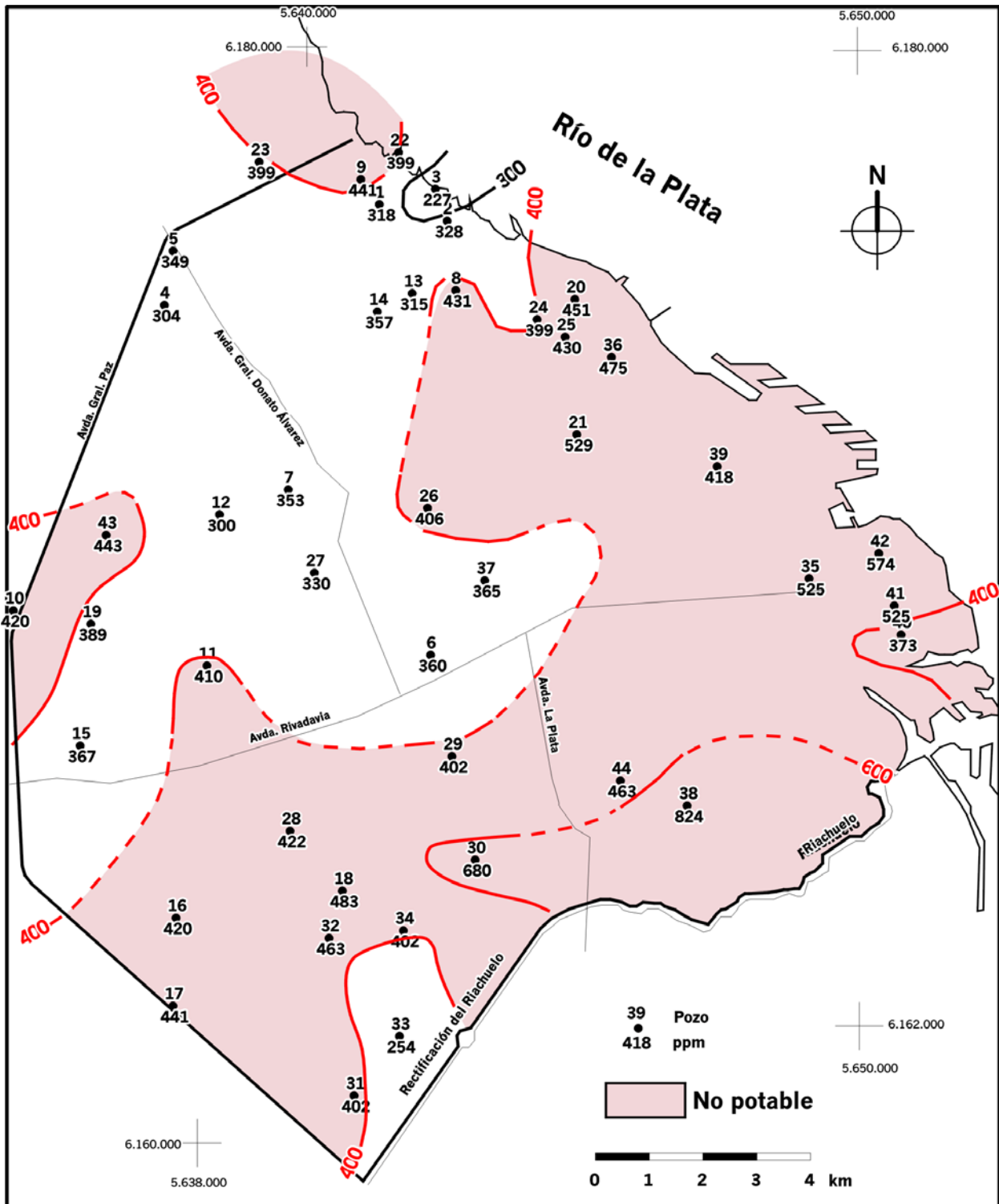
En el mapa 9 se aprecia un marcado predominio de valores entre 500 y 1.000 ppm (20 meq/l) de RS, pues salvo los sectores N con un máximo de 2.000 ppm (33 meq/l - pozo 20), el E (Reserva Ecológica) hasta 24.500 ppm (410 meq/l - pozo 40) y la margen izquierda del Riachuelo hasta 4.180 ppm (65 meq/l - pozo 38), el resto de la ciudad presenta contenidos menores a 1.000 ppm.

Los extremos de RS son 440 ppm (7,1 meq/l - pozo 3) y 24.500 ppm (pozo 40).

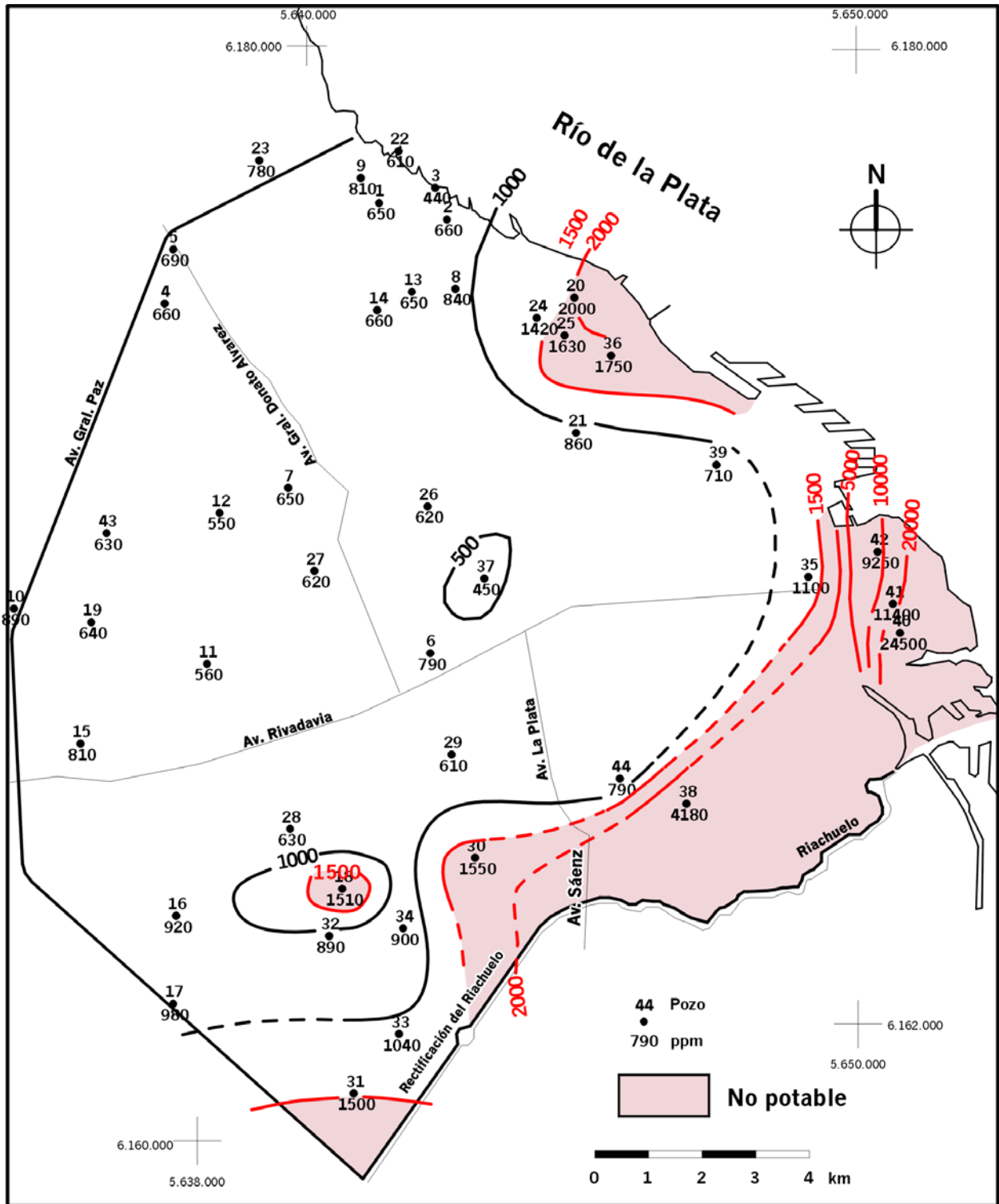
En general se aprecia correspondencia entre el incremento en la salinidad total y el sentido del flujo subterrá-



Mapa 7 - SULFATOS



Mapa 8 - ALCALINIDAD (CO₃Ca)



Mapa 9 - RESIDUO SECO

neo, aunque constituyen excepciones los mayores contenidos de los pozos 10 y 15 respecto a otros ubicados aguas abajo (11,12 y 3). También resulta evidente que el brusco aumento en el RS de los pozos 40,41 y 42 no deriva del recorrido subterráneo sino de un factor geológico, pues allí los Sedimentos Pampeanos faltan por erosión y el Postpampeano, de origen marino, se apoya directamente sobre el Puelche.

De acuerdo a la norma de calidad establecida en el Decreto 999/92, alrededor de 37 km² de la superficie total de la ciudad (200 km²) presenta agua inapta para el consumo humano, o sea con más de 1.500 mg/l de salinidad total.

7.3.5. DUREZA

Es la propiedad del agua que inhibe la espuma del jabón o produce incrustaciones, especialmente al ser calentada.

Los componentes comunes que producen dureza son el Ca⁺⁺ y el Mg⁺⁺; otros como el hierro, manganeso, aluminio, cinc y estroncio, rara vez se presentan en cantidades apreciables en las aguas naturales.

La dureza total es la suma de la temporaria, derivada de bicarbonatos y eventualmente de carbonatos, más la permanente que deriva de SO₄, Cl y NO₃.

En el mapa 10 se indica la variación espacial de la dureza expresada como CO₃Ca, con valores dominantes entre 150 y 400 ppm. Vuelven a destacarse los sectores de la Reserva Ecológica con hasta 6.200 ppm (pozo 40) y la margen izquierda del Riachuelo con hasta 1.005 ppm (pozo 38). A los citados se agrega un sector ubicado al SO de la ciudad con algo más de 400 ppm (pozos 15 y 17) y un alto cerrado con 617 ppm (pozo 18).

De acuerdo a la norma de calidad de agua librada al servicio (Decreto 999/92), el límite de potabilidad para la dureza es 400 ppm de CO₃Ca y en el mapa 10 puede apreciarse que los ámbitos inaptos ocupan 42 km² respecto a la superficie total (200 km²).

No se conocen alteraciones fisiológicas por la ingesta de aguas duras y los límites de potabilidad establecidos por la mayoría de los países y organismos, deben su origen a aspectos económicos como ahorro de jabón y preservación de cañerías frente a la incrustación.

7.3.6. NITRATOS

Los nitratos son los contaminantes que más afectan a las aguas superficiales y subterráneas a nivel mundial.

En las zonas urbanas, normalmente derivan de contaminación por: vertidos domésticos (pozos ciegos), pérdidas en redes cloacales y basurales. Dado que constitu-

yen la forma más estable y móvil de la materia nitrogenada, tienen gran persistencia y sólo salen de la solución, cuando el agua se encuentra en medio reductor, o son reducidos por actividad bacteriana.

En la región estudiada los dos altos con más de 45 ppm (límite de potabilidad), ubicados en el sector NO y SO de la ciudad (mapa 11), y que en conjunto ocupan 43 km² (pozos 1,2,4,5,7,8,9,12,13,14,23 y 24, en el NO) y pozos 15,16 y 17 en el SO, parecen derivar de vertidos en barrios periféricos del Conurbano, carentes de servicios cloacales. El alto tenor del pozo 6 de 118 ppm (1,9 meq/l), puede deberse a la contaminación derivada de silos para almacenamiento de grano.

7.3.7. SODIO

Es el más difundido de los metales alcalinos en las aguas superficiales y subterráneas; le sigue en importancia el potasio y mucho menos frecuentes son el litio, rubidio y cesio.

Las fuentes más trascendentes de aporte son: los feldespatos alcalinos y calcoalcalinos, el intercambio de bases, la lluvia, la contaminación urbana e industrial y el lavado de sedimentos marinos.

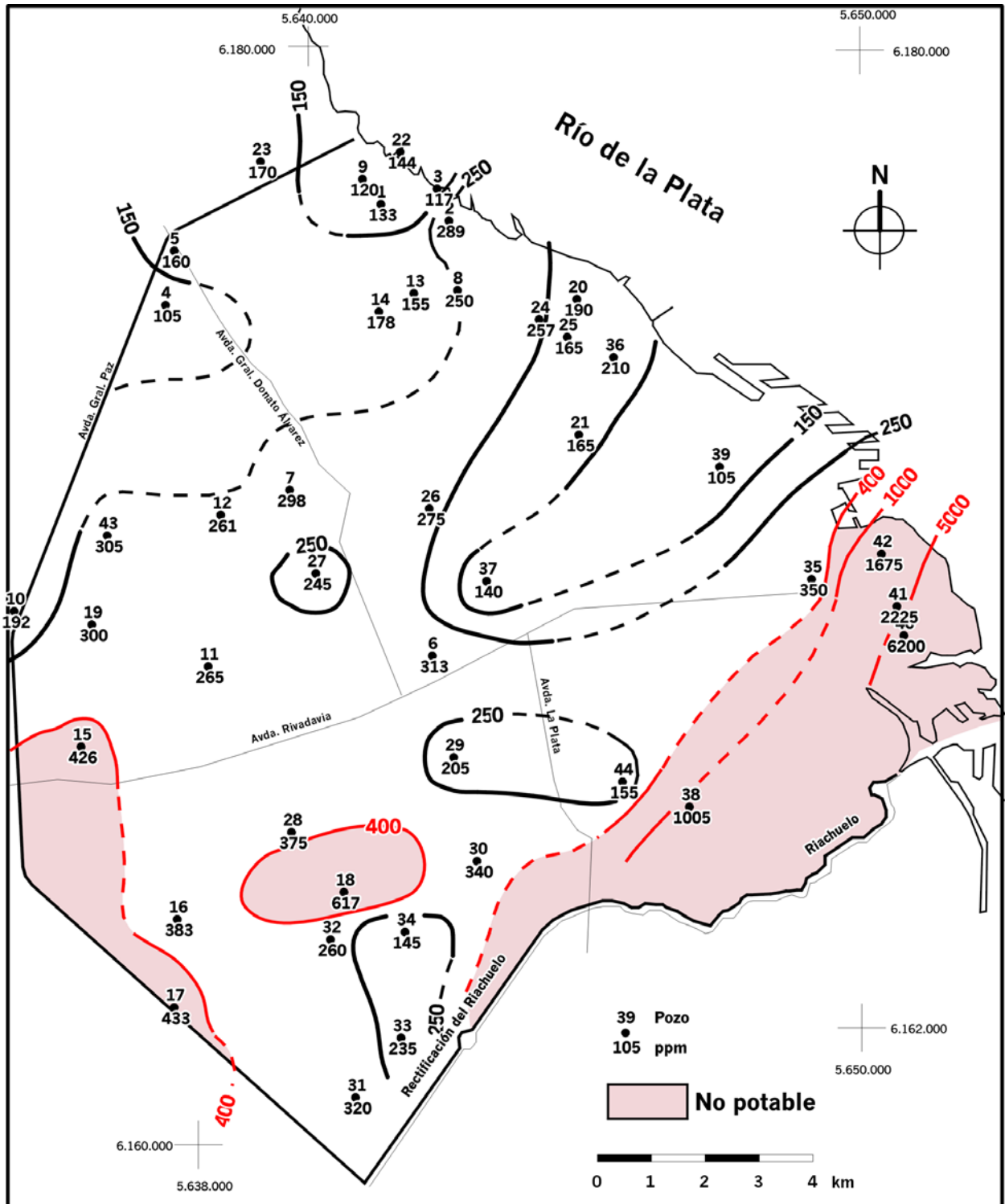
Es muy abundante en el agua de mar, constituyéndose en el catión dominante con una concentración media de 10 g/l.

En la Terraza Alta, proviene de la disolución de las plagioclasas medias (andesinas) existentes en el loess, derivadas de rocas volcánicas mesosilícicas. Otra fuente más importante que la anterior, es el intercambio de bases o iónico, por el que un agua dura (cálcica o magnésica) se ablanda al quedar fijados el Ca o el Mg⁺⁺ en la estructura cristalina de arcillas como la montmorillonita, mientras que el Na⁺⁺ pasa a la solución. En la Terraza Baja el sodio es de origen marino.

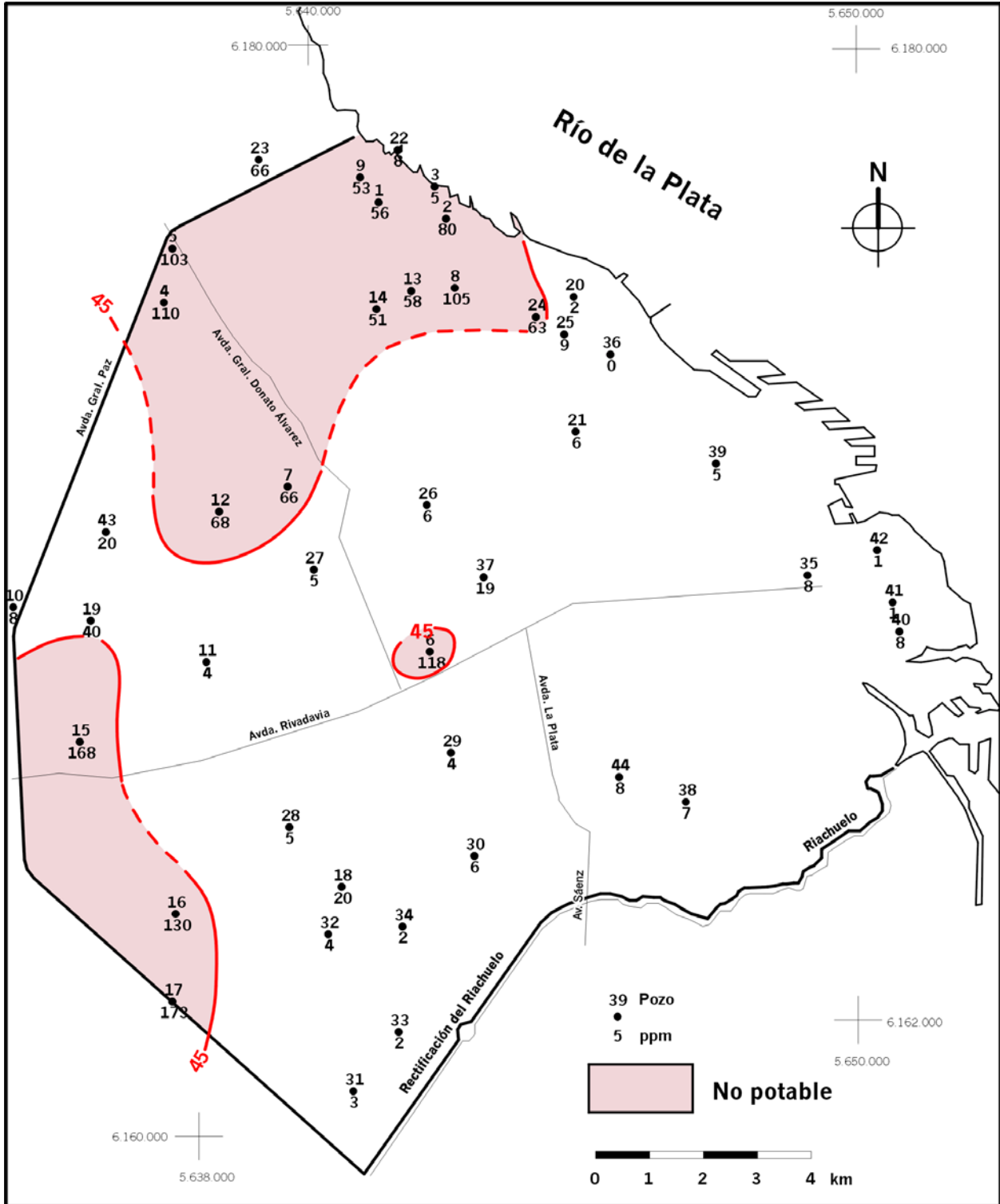
Los contenidos extremos son: 71 y 6.555 mg/l (3,1 y 285 meq/l – pozos 19 y 40) y el promedio 249 mg/l (10,8 meq/l).

En el mapa 12 se representa la variación en el contenido de Na, apreciándose un incremento gradual desde 100 ppm (4,3 meq/l) en el sector O de la ciudad hasta 400 ppm (17,4 meq/l) en el sector oriental. Dicho aumento se da en coincidencia con el sentido del flujo subterráneo (mapa 5).

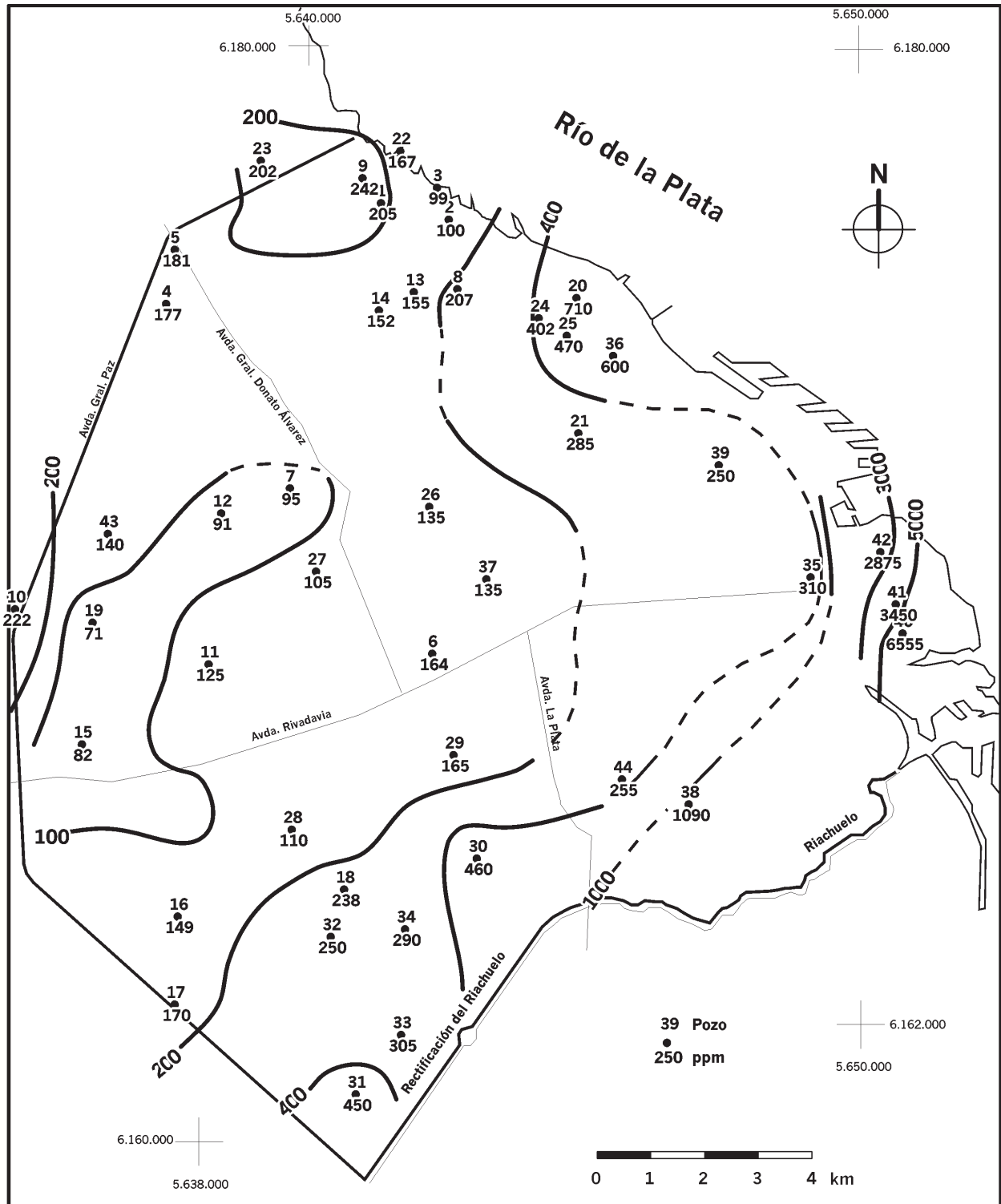
A partir de la isolínea de 400 ppm se produce un rápido aumento hacia el SE (pozo 38 – 1.090 ppm) y luego otro mucho más fuerte hacia el E, en los pozos de la Reserva Ecológica, que culmina con 6.555 ppm (285 meq/l – pozo 40). Ya se mencionó que el alto tenor de Na en la Terraza Baja, tiene su origen en las intrusiones marinas del Holoceno.



Mapa 10 - DUREZA



Mapa 11 - NITRATOS



Mapa 12 - SODIO

Respecto a la actividad fisiológica humana, la ingesta de agua con alta concentración de Na^+ puede afectar la tensión arterial y la actividad renal. Pese a ello la gran mayoría de las normas de potabilidad no lo considera como limitante, probablemente porque su determinación analítica recién se precisó en la década del 50 con la utilización del fotómetro de llama. Por ello las normas consideran a los cloruros, de más sencilla determinación, pero que sólo le otorgan al agua gusto salado. Además el Na suele asociarse al CO_3H^- en las aguas de media a baja salinidad y rara vez lo hace con el Cl, salvo en franjas de salinidades elevadas.

La única norma que conoce el autor sobre potabilidad respecto al sodio, es la canadiense que le fija un límite de 200 mg/l (8,7 meq/l).

El alto contenido en sodio limita la aptitud del agua para riego pues dispersa las partículas de arcilla del suelo, modificando su textura y estructura, haciéndole perder migajosidad y consecuentemente aireación. Esto puede afectar severamente la actividad de las plantas a nivel radicular.

7.3.8. POTASIO

Pese a que se presenta en concentraciones muy similares al Na^+ en las rocas ígneas y lo supera con amplitud en las hidrolisitas (arcillas), aparece muy subordinado a éste en las aguas continentales y en las marinas (Hem,1959). Esta situación deriva de la baja movilidad que tiene el K^+ , debido a la facilidad con que es fijado por las arcillas.

El K^+ generalmente proviene del ataque a silicatos potásicos como la ortosa y el microclino, aunque también forma parte de algunos feldespatoides y micas.

En términos generales los aluminio-silicatos de potasio son más resistentes al ataque químico que los de sodio y esto constituye otra causa que explica el neto predominio del Na^+ sobre el K^+ en la hidrósfera.

El Loess Pampeano, está formado en parte por feldespato potásico alterado (ortosa), proveniente de rocas ácidas (riolitas), que sería la principal fuente de aporte de K^+ al suelo y al agua.

Los contenidos extremos son 4 ppm/l (0,1 meq/l pozos 27 y 28) a 125 ppm (3,2 meq/l – pozo 40), con un promedio de 14 ppm (0,4 meq/l).

En el mapa 13 se aprecia una faja que, en forma de U, ocupa el sector central de la ciudad, con concentraciones menores a 10 ppm (0,25 meq/l) de K en el Acuífero Puelche. Al N y al S de la faja de baja concentración, se emplazan otras 2 con contenidos mayores a 10 y aún a 20 ppm (0,5 meq/l), aunque en el interior de la ubicada al S, se destaca un bajo semicerrado con 3 pozos que registraron 8 ppm (0,2 meq/l).

La distribución areal en el contenido de K, no se corresponde con el sentido de flujo del Acuífero Puelche.

7.3.9. CALCIO

Junto con el Mg^{++} es el más abundante de los alcalino-térreos en las aguas naturales. En las continentales, generalmente el Ca^{++} predomina sobre el Mg^{++} , aunque no es raro que suceda lo contrario, en función de: el componente litológico del acuífero, la precipitación de Ca como CO_3^- o SO_4^- y de su fijación por intercambio iónico.

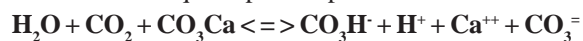
En las aguas marinas, la relación favorece al Mg^{++} en valores aproximados de 5 a 1 (Custodio,1976).

La mayor parte del Ca en solución proviene de los componentes mineralógicos del Loess Pampeano, en especial de la disolución del CO_3Ca epigenético, que se presenta diseminado, o formando nódulos o bancos, lo que deriva en un aumento de la compacidad y resistencia del sedimento, originando lo que se conoce vulgarmente como “tosca”.

Otra de las vías de aporte, es el ataque químico a las plagioclasas mesosilícicas y básicas, que componen una parte importante de la fracción arenosa del Pampeano.

La solubilidad del CO_3Ca (calcita), está controlada por la concentración de CO_2 disuelto, dado que este forma CO_3H_2 , que al disociarse constituye una importante fuente de producción de H.

La ecuación que explica el proceso es:

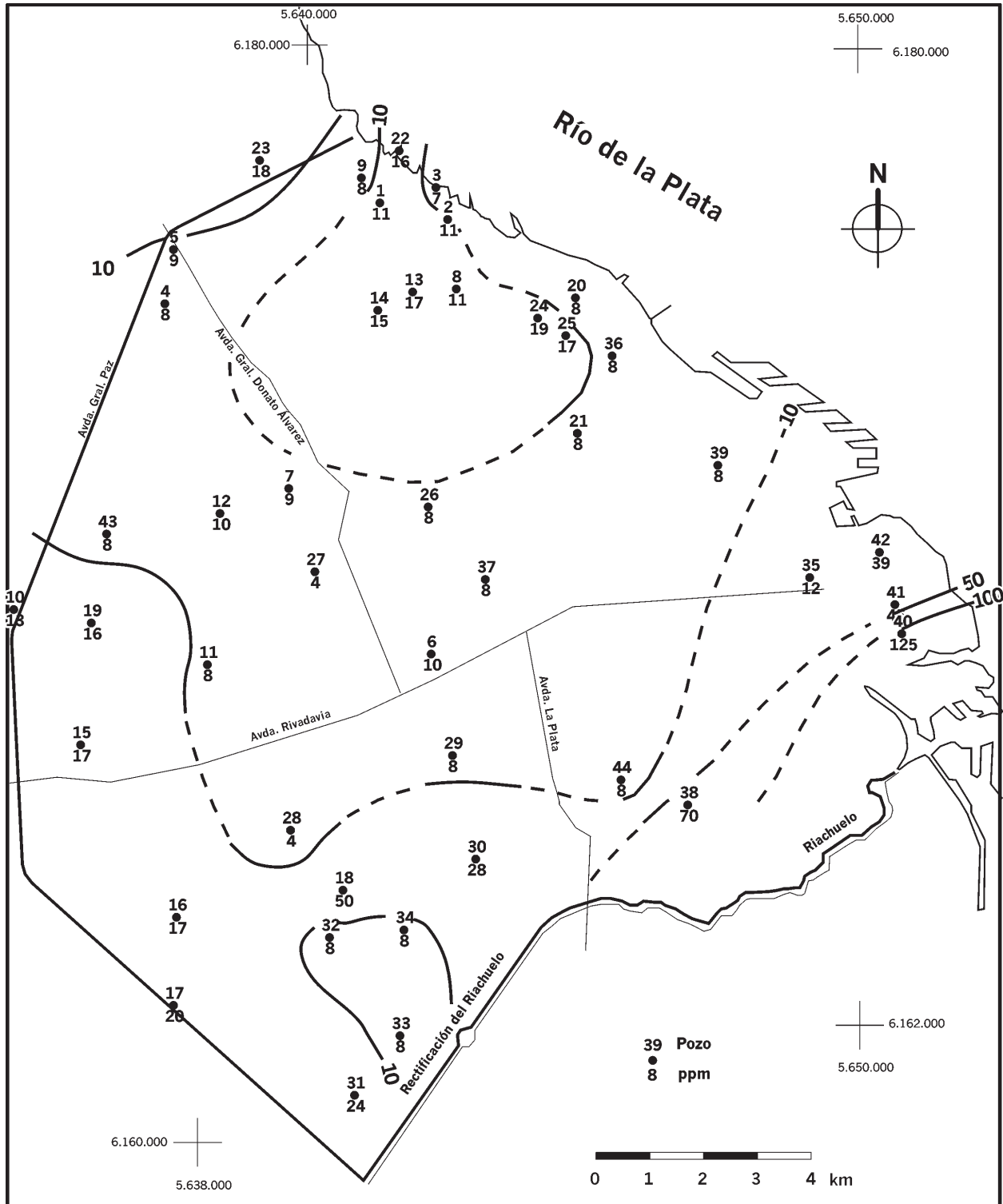


De existir CO_2 disponible y para un pH menor a 8,2, los compuestos en solución serán CO_3H^- y Ca^{++} , pero no CO_3^- . Por ello, es muy rara la presencia de CO_3^- en solución en la mayoría de las aguas naturales (sin tratamiento), dado que tienen pH menores a 8,2. Esta situación puede modificarse en aquellas sometidas a contaminación o tratamiento y en los sistemas termales.

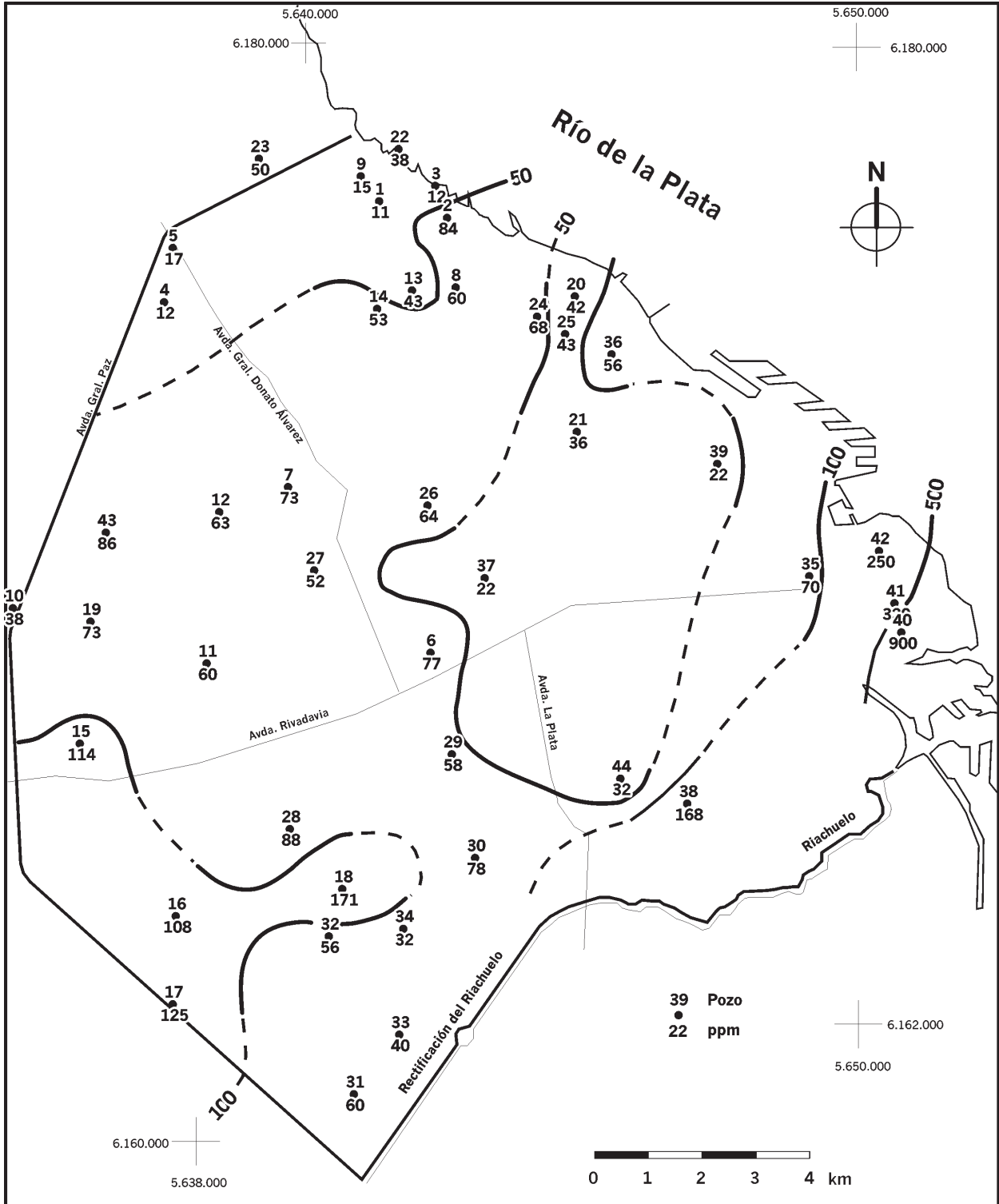
En el punto 7.3.5 se hizo mención a la incidencia del Ca^{++} en la dureza y en el 7.3.7, al intercambio iónico por el que el agua subterránea se ablanda naturalmente, al quedar atrapado el Ca^{++} en las arcillas, que simultáneamente liberan Na a la solución. Este proceso es el causante del notorio predominio de agua bicarbonatada sódica en el Acuífero Puelche, por el intercambio que sufre el agua cálcica del Pampeano, al atravesar el acuitardo que lo separa del Puelche.

Los contenidos extremos de calcio son 11 ppm (0,55 meq/l – pozo 1) y 900 ppm (45 meq/l – pozo 40), con un promedio de 60 ppm (3 meq/l).

El mapa 14 muestra contenidos mayores a 100 ppm (5 meq/l) en el sector SO de la ciudad y una disminución paulatina en el sentido del flujo, a menos de 50 ppm (2,5 meq/l) en el sector N (pozos 1,3,4,5,9,13,22 y 23) y



Mapa 13 - POTASIO



Mapa 14 - CALCIO

centro – E (pozos 20,21,25,37,39 y 44). La disminución de Ca^{++} en el sentido del movimiento, es una característica del flujo de tipo regional.

En la Reserva Ecológica (pozos 40,41 y 42), como sucede con el resto de los contenidos iónicos, salvo CO_3H , se registraron los mayores tenores de Ca^{++} del ámbito investigado.

Las normas de potabilidad argentinas y extranjeras, no incluyen al calcio y algunas, al considerar la dureza como limitante respecto a la aptitud del agua, implícitamente lo contemplan junto con el magnesio.

7.3.10. MAGNESIO

Junto con el calcio, son los alcalinotérreos más frecuentes en la hidrosfera.

El magnesio proviene de la alteración de silicatos ferromagnesianos, que participan como constituyentes comunes de las rocas básicas y ultrabásicas y de la disolución de rocas calcáreas como calizas y dolomitas, particularmente de estas últimas, que son las que lo tienen en mayor cantidad como CO_3Mg (Hem, 1959).

En el agua subterránea de la Terraza Alta, su origen puede explicarse en el ataque químico a los máficos que componen el Loess Pampeano (anfíboles y piroxenos) y en la disolución de la tosca que, aunque en baja proporción, también contiene CO_3Mg .

En la Terraza Baja, además del citado, su origen deriva de las intrusiones marinas acaecidas durante el Holoceno.

Ya se mencionó en el punto 7.3.5, que el Mg^{++} y el Ca^{++} son los cationes más comunes que le otorgan dureza al agua y además, el Mg^{++} actúa como laxante, especialmente cuando el agua es sulfatada.

Tanto en combinación con el CO_3^- como con el SO_4^- , el magnesio es mucho más soluble que el calcio, en proporciones aproximadas de 10 a 1 y de 180 a 1 respectivamente. Esto motiva que una vez en solución, sea más estable que el Ca^{++} y menos frecuente su precipitación. Por ello, los cambios más importantes en la concentración del Mg^{++} derivan de procesos de intercambio iónico.

En el agua continental la relación $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ comúnmente varía entre 5 y 1, mientras que en la de mar se invierte aproximadamente a 0,2.

En el ámbito estudiado, se detectaron valores extremos de 960 ppm (80 meq/l) y 6 ppm (0,5 meq/l – pozo 34), con un promedio de 27 ppm (2,25 meq/l).

El mapa 15 reproduce las variaciones areales del Mg^{++} , apreciándose que en la mayor parte de la Terraza Alta, el contenido varía entre 20 y 40 ppm (1,7 y 3,4 meq/l), aunque también se presentan algunos bajos de menor extensión, con menos de 20. En la Terraza Baja, especialmente

en la Reserva Ecológica, se registra el máximo contenido de Mg^{++} en el Acuífero Puelche (960 ppm – pozo 40).

Ya se mencionó que el Mg^{++} , en concentraciones elevadas, particularmente en aguas sulfatadas, les otorga propiedades laxantes. Sin embargo, ni las normas nacionales ni las internacionales, lo incluyen como limitante de la potabilidad, restringiéndola en este aspecto a la dureza, o al contenido en SO_4^- .

7.3.11. RELACIÓN NA/CA

Indica el tipo de agua en relación a la dureza; como en todas las relaciones iónicas, los componentes deben expresarse en meq/l. Existe un notorio predominio de Na^+ sobre Ca^{++} pues de las 44 muestras analizadas, sólo 2 (pozos 15 y 19) tienen más calcio que sodio. Los extremos para la relación son 34 (pozo 38) y 0,6 (pozo 15), con un promedio de 6 (tabla 6). Por lo tanto el Na^+ domina sobre el Ca^{++} en una relación de 6 a 1, considerando valores medios. En el mapa 16 puede observarse un incremento de la relación en el sentido del flujo subterráneo, pues de valores menores a 1 en el SO (pozos 15 y 19), se pasa a un índice entre 1 y 5 en el sector central, posteriormente a una faja entre 5 y 10 y, finalmente, a valores mayores a 10 en el ámbito de descarga (Terraza Baja). Lo antedicho implica un ablandamiento natural del agua en el sentido del flujo, debido al incremento en el contenido de Na^+ y a la disminución en el de Ca^{++} .

7.3.12. CAMBIO DE BASES (CB)

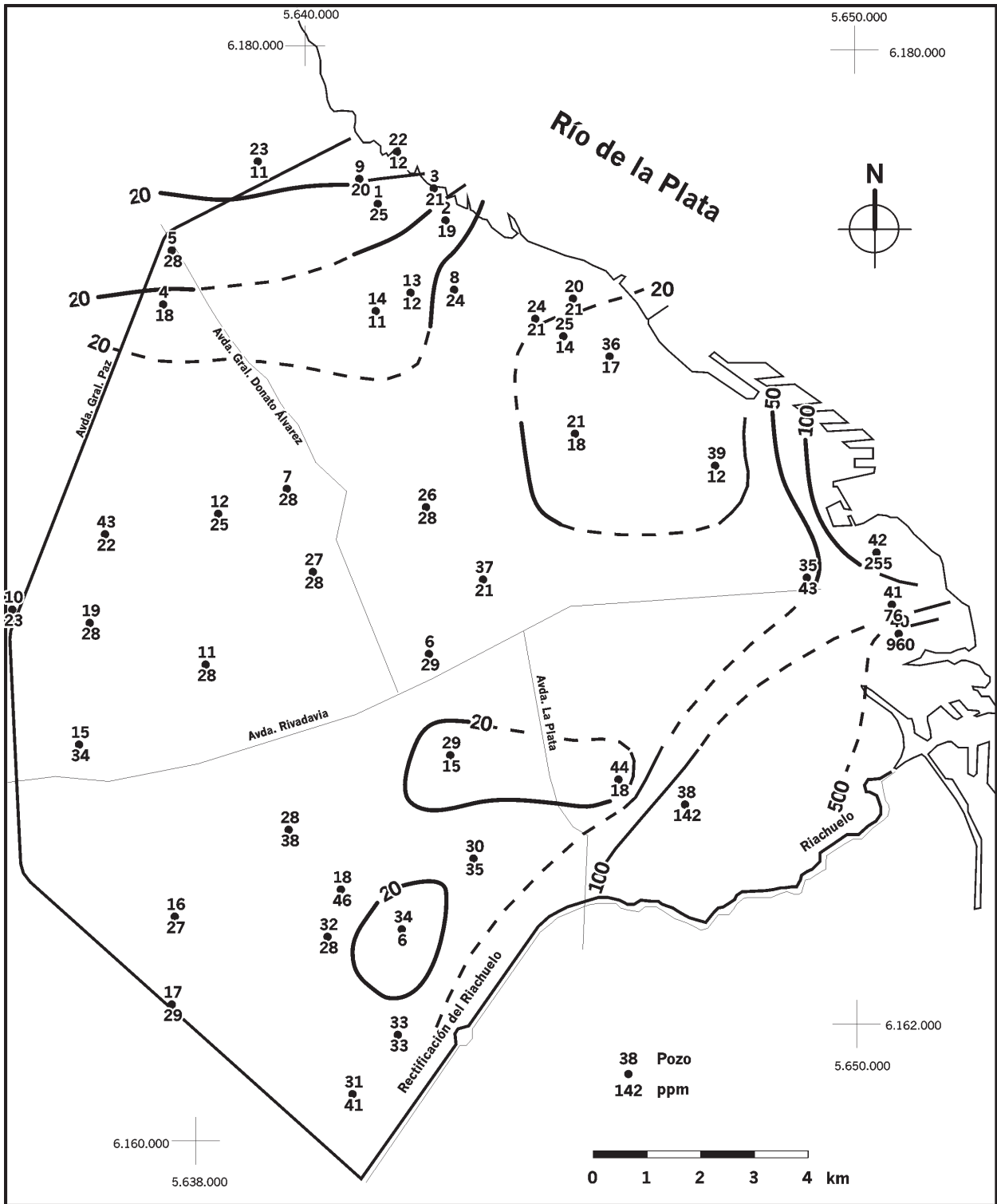
Es una relación que vincula a los cloruros con los alcalinos. La expresión más empleada es:

$$\text{cb} = [\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)] / \text{Cl}^-$$

De la tabla 6 se desprende una notoria prevalencia de valores negativos, salvo los pozos 40 y 41, que indica predominio de alcalinos sobre cloruros, en este caso del Na^+ sobre el Cl^- . Los extremos son – 5,3 y + 0,2 y el promedio – 2,5.

7.3.13. APTITUD

Consumo humano. Se mencionó en el capítulo 7.3.4 que la salinidad total limita la potabilidad del Acuífero Puelche en la Terraza Baja (37 km²), donde registra más de 1.500 ppm y en el 7.3.6, que el alto contenido en NO_3^- (más de 45 ppm) lo hace en otros 42 km² de la Terraza Alta. Por lo tanto el ámbito afectado ocupa aproximadamente el 40% de la superficie de la ciudad (200 km²). Aún así, la reserva de agua potable es considerable (515 hm³).



Mapa 15 - MAGNESIO

Riego. A fin de establecer la aptitud del agua para regar, se empleó la clasificación del U.S. Salinity Laboratory (1954), que toma en consideración la conductividad eléctrica (CE) y la relación adsorción sodio (RAS). Esta clasificación, desarrollada para ambientes áridos (con déficit en el balance), es exigente para los de clima húmedo como el estudiado. Las figuras 28 a 30 reproducen los diagramas de CE-RAS con la ubicación de las muestras obtenidas en esta investigación y de los mismos se puede concluir que: 17 caen en el campo C3R1 (riesgo de salinidad alto y de sodicidad bajo), 15 en el campo C3R2 (riesgo de salinidad alto y de sodicidad medio), 4 muestras (pozos 38, 40, 41 y 42) caen fuera del diagrama (riesgo de salinidad y sodicidad muy altos) y las 8 restantes se reparten en los campos C2R1 (2), C3R3 (3), C4R2 (1) y C4R4 (1). Auge (1997), al tratar la aptitud del agua para riego en La Plata concluye que: “Por lo tanto, tomando ambos acuíferos el 69% de las muestras presenta baja sodicidad y de media a alta conductividad eléctrica, pero la ausencia de salinización en el suelo de la Llanura alta, indica que el agua es apta para riego, aún con el agravante de que hace unos 70 años que se lo practica de 6 a 7 meses por año”. Estos mismos conceptos son aplicables al Acuífero Puelche en el ámbito de la Terraza Alta de la ciudad de Buenos Aires, donde se aplica riego temporario con agua subterránea en parques, plazas, jardines y ramblas, sin evidencia de salinización del suelo. Lo expuesto indica que el agua del Puelche es apta para riego, salvo en la Terraza Baja por su elevada salinidad y contenido en Na.

Industria. Custodio (1976), presenta una clasificación para aguas de uso industrial, en función de la dureza, aclarando que la misma depende del proceso involucrado. Para calderas, enfriamiento y para producción de vapor, que involucran procesos de alta exigencia en lo referente a dureza, establece: agua blanda menos de 50 mg/l de CO_3Ca , ligeramente dura de 50 a 100, moderadamente dura de 100 a 200 y dura más de 200 mg/l. Dado que el agua subterránea de la Terraza Alta varía en dureza entre 150 y 400, con un promedio de 260 ppm, se la puede calificar como de dura a moderadamente dura, mientras que en la Terraza Baja con un promedio de 2.800 ppm de CO_3Ca , es extremadamente dura.

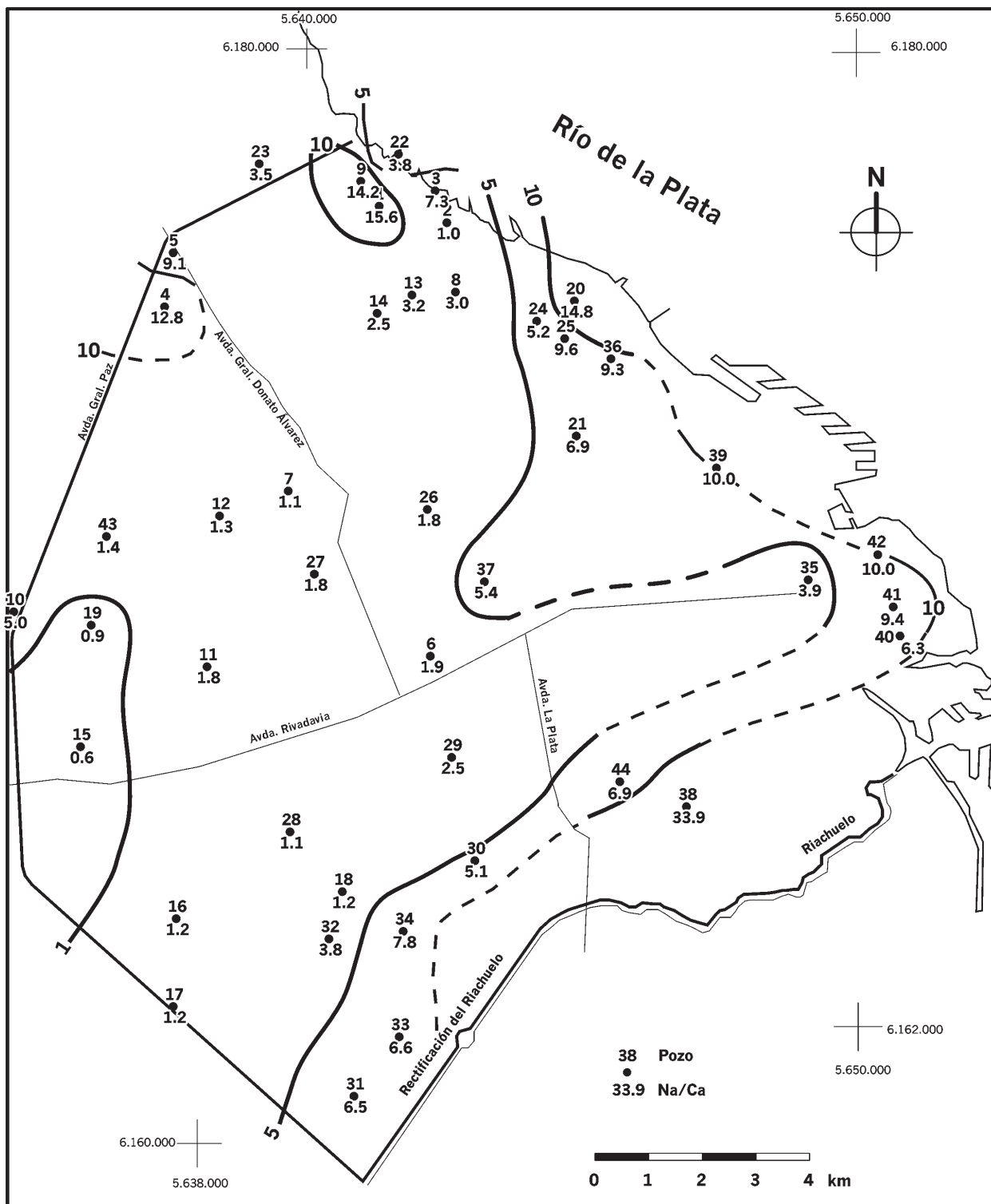
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La investigación hidrogeológica permitió establecer que el Acuífero Puelche constituye una importante

reserva alternativa para la provisión de agua a la ciudad de Buenos Aires, cuyo abastecimiento actual se efectúa exclusivamente mediante potabilización de la proveniente del Río de la Plata. Esta reserva alternativa podría aprovecharse, mediante la captación por perforaciones, para asegurar el abastecimiento a instituciones como hospitales, escuelas, etc, en el caso de fallar, como ya ha ocurrido, el servicio actual de provisión de agua potable.

- Del total de la lluvia media anual que cae en Buenos Aires (232 hm³), la evapotranspiración consume 169 hm³, la recarga del Pampeano por infiltración oscila en 9 hm³/a y la escorrentía en 54 hm³. El Acuífero Puelche recibe del Pampeano, aproximadamente 4 hm³/a por filtración vertical descendente.
- El flujo subterráneo principal atraviesa la ciudad de SO a NE, descargando en el Río de la Plata. Otra línea de descarga secundaria coincide con el Riachuelo. El flujo conjunto es del orden de 10.000 m³/d.
- Los ámbitos más favorables para la explotación se emplazan en la Terraza Alta (por encima de cota 10 m) pues en la Baja (por debajo de cota 5 m), el agua del Puelche tiene elevada salinidad en una extensión de unos 37 km² (riberas de los ríos de la Plata y Matanza). En dos sectores de la primer geoforma, ubicados al NO y SO del ejido urbano, el contenido en NO_3 también limita la potabilidad. Este ámbito ocupa unos 43 km². Por lo tanto aproximadamente el 40% del área estudiada, carece de agua potable debido al alto contenido salino y en nitratos. Pese a ello existe una reserva considerable de agua subterránea potable (515 hm³) en los 200 km² que ocupa el distrito federal. También es utilizable para riego y para la industria el agua del Puelche en la Terraza Alta, pero no en la Baja.
- Respecto a su composición aniónica domina notoriamente el tipo bicarbonatado, con 36 muestras sobre 44 analizadas (82%); 7 muestras son cloruradas y sólo 1 sulfatada. El agua clorurada se emplaza en la Terraza Baja, donde el Cl promedia 210 meq/l. En la Terraza Alta el agua es bicarbonatada con una media de 8 meq/l y el Na^+ , con una media de 11 meq/l domina ampliamente sobre el Ca^{++} (2,8 meq/l), el Mg^{++} registra 2,2 y el K sólo 0,4 meq/l. Por lo tanto el agua es bicarbonatada sódica en la Terraza Alta y clorurada sódica en la Baja.

- De la relación flujo – concentración surge que el incremento gradual de cloruros, sulfatos y sodio y la



Mapa 16 - RELACIÓN Na/Ca

disminución de calcio, en el sentido del escurrimiento, tipifica a un flujo regional para el Acuífero Puelche, en el ámbito de la Terraza Alta. En la Terraza Baja, los gradientes de aumento en los iones citados son mucho más fuertes y derivan de la salinización producida por las intrusiones marinas holocenas.

Se recomienda:

- Realizar un monitoreo semestral con medición de niveles y toma de muestras para determinaciones analíticas en una red integrada por los pozos: 5,6,7,8,9,15,16,20,21,26,34,35,38,40 y 43. Además de las sustancias analizadas para este proyecto convendría agregar: F, As, metales, hidrocarburos totales, THM, bacterias aeróbicas, coliformes y pseudomonas aeruginosas. El objetivo del monitoreo es verificar el estado de la reserva y de la composición química y bacteriológica del agua subterránea, y sus posibles variaciones espaciales y temporales.
- Obtener de la Secretaría de Industria del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, la dirección de los establecimientos industriales, talleres, depósitos, hoteles, etc., que pudiesen abastecerse de agua subterránea, con la finalidad de establecer la magnitud de la explotación. Para concretar esta tarea y la anterior, sería conveniente formalizar un convenio UBA – Gobierno de Buenos Aires.
- Efectuar más ensayos de bombeo con el objeto de ajustar los parámetros hidráulicos de los acuíferos y del acuitardo.
- Requerir a Aguas Argentinas una estimación sobre el volumen de las fugas en tuberías de conducción de agua, a fin de precisar el monto de la recarga subterránea.

Los requerimientos a los entes citados previamente se realizaron durante la realización de este proyecto, pero con resultados negativos.

9. AGRADECIMIENTOS

Por la colaboración para la concreción de este proyecto se agradece a:

- Lic. María Nagy, por la elaboración del capítulo Modelo numérico.
- Lic. Guillermo de la Torre, por la realización del relevamiento hidrogeológico urbano.

- Secretaría de Ciencia y Técnica – UBA, por el otorgamiento del subsidio.
- Ing. Juan Forte Lay, por el software para el desarrollo del balance hídrico edáfico.
- Lic. Alejandro Castilla y D.I. Carlos Sánchez, por la compaginación y los dibujos.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUGE, M. P. 1978. Determinación del coeficiente de filtración vertical de capas filtrantes. *La Ingeniería* # 102: 95-101. La Plata.
- AUGE, M. P. y M. A. HERNANDEZ 1984. Características geohidrológicas de un acuífero semiconfinado en la Llanura Bonaerense. *Coloquio Intern. Hidrol. de Grandes Llanuras. UNESCO. Actas. Vol. III: 1019-1043.* Buenos Aires – París.
- AUGE, M. P. 1986. Hydrodynamic behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River basin. *Groundwater. Vol. 25, # 5: 636-642.* Dublin, Ohio.
- AUGE, M. P. 1990. Aptitud del agua subterránea en La Plata, Argentina. *Semin. Latinoam. sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Actas: 191-201.* Buenos Aires.
- AUGE, M. P. 1997. Investigación hidrogeológica de La Plata y alrededores. Tesis Doctoral Univ. de Buenos Aires. 2 T: 1-176. Buenos Aires.
- DALLA SALDA, L. 1981. El basamento de la Isla Martín García, Río de la Plata. *Rev. Asoc. Geol. Arg. TXXXVI, # 1: 29-43.* Buenos Aires.
- FRENGUELLI, J. 1955. Loess y limos pampeanos. *Univ. Nac. de La Plata. Ser. Técn. y Didáct. # 87: 1-88.* La Plata.
- HEM, J. D. 1959. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *Geol. Surv. WSP # 1473: 1-269.* Washington.
- KNOCHÉ, W. y V. BORZACOV 1947. Provincias climáticas de la Argentina. En *Geografía de la República Argentina. (GAEA). T. VI: 140-174.* Buenos Aires.
- McDONALD, M. G. y A. W. HARBAUGH 1988. A modular dimensional finite-difference ground-water flow model. *U.S. Geol. Survey Techniques of Water Resource Investigations. Book # 6 Ch. A1.*
- PIPER, A. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Am. Geophys. Union Trans. Vol. 25: 914-923.*
- SCHOELLER, H. 1935. Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparaison des eaux souterraines. *France Soc. Geol. Comptes Rend. Sommaire et Bull. Ser. 5, Vol. 5: 651-657.*

- TERUGGI, M. E. 1955. Apéndice; en Loess y Limos Pampeanos de J. Frenguelli. UNLP. Serie Técn. y Didáct. #7:1-88. La Plata.
- THORNTHWAITE, C. W. y J. R. MATHER 1957. Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. Climate Drexel Inst. of Tech. # 10: 185-311.
- U.S. SALINITY LABORATORY STAFF 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Dept. of Agriculture. Handbook # 60.
- YRIGOYEN, M. 1993. Morfología y geología de la ciudad de Buenos Aires. Evaluación e incidencia geotécnica. Asoc. Arg. de Geol. Apl. a la Ing. Actas. Vol. VII: 7-38. Buenos Aires.