

EXPLORACION SOSTENIBLE DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA PLATA – ARGENTINA

Miguel Auge¹

Resumen - La investigación hidrogeológica en un ámbito llano de 105.000 hectáreas, en el que la ciudad de La Plata se ubica aproximadamente en el centro, permitió identificar una región emplazada a unos 15 km del ejido urbano, que presenta condiciones favorables para la extracción de agua subterránea apta. En dicha región se propone la construcción de 30 pozos con los que se podría obtener 23,7 hm³/año (64.800 m³/día), caudal suficiente para abastecer con agua potable a 200.000 habitantes que hoy carecen de ella. El sitio elegido está protegido de la contaminación rural pues en el mismo se practica agricultura extensiva y ganadería, actividades que prácticamente no emplean agroquímicos. La distancia a la ciudad lo protege también de la contaminación urbana, que ha generado un grave deterioro en el agua subterránea que se usa para el abastecimiento de La Plata, por el elevado tenor en NO₃⁻. Para verificar las condiciones de un aprovechamiento sustentable respecto a la explotación, se elaboró un modelo para un régimen de flujo variable, que predice la estabilidad piezométrica del Acuífero Puelche al cabo de 60 días de bombeo continuado. El equilibrio hidráulico deriva del aporte por flujo vertical descendente desde un acuífero sobrepuesto (Pampeano), cuya recarga se produce por infiltración de la lluvia. En dicho lapso el cono de depresión generado por el bombeo de los 30 pozos ocuparía unas 29.000 ha y en dicha superficie la recarga ascendería a 77,5 hm³/a, frente a 38,7 hm³/a correspondiente a la extracción. Bajo dichas condiciones la recarga permitiría una rápida estabilidad piezométrica como consecuencia de la relación entre las entradas y las salidas de agua al y del sistema subterráneo, asegurando un aprovechamiento sustentable del recurso.

Palabras clave - agua subterránea, aprovechamiento sustentable, La Plata, Argentina

¹ Profesor Titular de Hidrogeología, Universidad de Buenos Aires; Investigador del CONICET. Ciudad Universitaria, Pabellón II (1428) Buenos Aires, e mail: auge@way.com.ar

UBICACIÓN.

El ámbito estudiado se sitúa en el extremo NE de la Provincia de Buenos Aires, lindero con el Río de la Plata; ocupa una extensión de 105.000 hectáreas con la ciudad de La Plata aproximadamente en su centro y forma parte del borde SE de la gran Llanura Chacopampeana (figura 1). El límite NE es el Río de la Plata, mientras que el resto coincide con divisorias hidrográficas.

POBLACIÓN Y ECONOMÍA.

La población asentada en el ámbito estudiado es de unos 690.000 habitantes, de los cuales 640.000 habitan en centros urbanos y 50.000 en la zona rural. En relación a los aspectos económicos y de producción, las mayores plantas fabriles se ubican entre la ciudad de La Plata y la costa del río homónimo y utilizan agua del mismo, dado el elevado tenor salino que caracteriza al agua subterránea de la Planicie costera. Contrariamente, en el Partido de La Plata, emplazado casi totalmente por encima de la cota 10 m (Llanura alta), la aptitud del agua subterránea, hace que la industria se abastezca mediante perforaciones que captan del Acuífero Puelche. Además, existe una importante zona rural de producción flori-hortícola, que también emplea agua subterránea para riego.

GEOLOGÍA Y COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO.

En la descripción, se hará referencia a la constitución geológica y a su incidencia sobre el comportamiento hidrogeológico, comenzando por las unidades más modernas, debido a que son las que están en contacto directo con las fases atmosférica y superficial del ciclo hidrológico. **Postpampeano** (Holoceno). También se lo conoce como Sedimentos Postpampeanos y está constituido por arcillas y limos arcillosos y arenosos de origen marino, fluvial y lacustre, acumulados en ambientes topográficamente deprimidos (Planicie costera, valles fluviales y bañados o lagunas). El espesor varía entre algunos centímetros en la Llanura alta (cauces) y unos 25 m en la ribera del Río de la Plata. Poseen muy poca capacidad para transmitir agua por lo que actúan como acuitardos o acuicludos (Auge, 1990). Además, existe una notable correspondencia entre el Postpampeano y la presencia de agua salada en el perfil, aún en las unidades más profundas (Pampeano y Arenas Puelches). En la figura 2 se representa la disposición vertical del Postpampeano y otras unidades más antiguas, a lo largo de una traza que

atraviesa la Llanura alta y la Planicie costera hasta el Río de la Plata. **Pampeano** (Pleistoceno medio - superior). También denominado informalmente como Sedimentos Pampeanos. Se emplaza por debajo del Postpampeano en la Planicie costera y subyace a la cubierta edáfica en la Llanura alta donde, localmente, puede estar cubierto también por un delgado espesor de Sedimentos Postpampeanos en los fluvios y en algunas depresiones cerradas (bañados). En la figura 3 se indica la distribución areal del Pampeano, que está formado por limo arenoso de origen eólico (loess) y fluvial, con abundante plagioclasa, vidrio volcánico y CO_3Ca pulverulento, nodiforme y estratiforme (tosca). El espesor del Pampeano está controlado por los desniveles topográficos y por la posición del techo de las Arenas Puelches, variando entre extremos de 50 m en la Llanura alta y 0 m en la costa del Río de la Plata, donde fue totalmente erosionado (Auge, 1990). La trascendencia del Pampeano radica en que actúa como vía para la recarga y la descarga del Acuífero Puelche subyacente, que es la unidad hidrogeológica más importante de la zona estudiada. **Arenas Puelches** (Plio-Pleistoceno). Es una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas, blanquecinas y amarillentas, con estratificación gradada. Se superponen en discordancia erosiva a las arcillas de la Formación Paraná y constituyen el acuífero más importante de la región por su calidad y productividad. Las Arenas Puelches son de origen fluvial, ocupan en forma continua unos 83.000 km² en el subsuelo del NE de la Provincia de Buenos Aires y se extienden también hacia el N en la de Entre Ríos y hacia el NO en las de Santa Fe y Córdoba (Auge, 1986). En la zona estudiada el techo del Puelche se ubica entre 20 y más de 50 m de profundidad (figura 4) y su espesor varía entre algo menos de 20 y algo más de 30 m (figura 5). Todos los pozos del servicio de agua potable de La Plata y alrededores captan este acuífero, que también se aprovecha para riego y para la industria, con producciones individuales entre 40 y 160 m³/h, de agua bicarbonatada sódica, con una salinidad total menor a 1 g/l. En la Planicie costera, la salinidad aumenta notablemente, superando en algunos casos 20 g/l, con agua del tipo clorurada sódica. Es muy poco lo que se conoce respecto a las unidades hidrogeológicas que subyacen al Puelche, debido a que tanto en la zona estudiada como en otras vecinas, poseen aguas con elevados tenores salinos. Pese a ello se han reconocido: **Formación Paraná** (Mioceno). Tiene origen marino, subyace al Puelche y se desarrolla entre unos 65 y 295 m de profundidad. **Formación Olivos** (Oligoceno). Tiene origen continental, con participación eólica y fluvial. Subyace a la Fm. Paraná mediante una superficie de discordancia erosiva y en La Plata, se apoya sobre el basamento cristalino, abarcando el tramo del perfil que va desde 295 a 485 m de

profundidad. **Basamento cristalino** (Precámbrico). Constituye la base impermeable del sistema hidrológico subterráneo. En el sitio estudiado está formado por rocas cristalinas, que por su textura carecen de porosidad primaria y por lo tanto actúan como acuífugas. El basamento fue alcanzado en La Plata a 485 m de profundidad.

MORFOLOGÍA.

La región estudiada integra el sector austral de la gran Llanura Chacopampeana y se caracteriza por ser un ámbito con pendiente dominante hacia el NE y cotas extremas de 30 m en la divisoria coincidente con el límite SO y de 0 m en la ribera del Río de la Plata. Entre dichos ámbitos, los gradientes topográficos extremos varían entre 1,3 y 0,7 m/km. Dentro de la región llana mencionada, se pueden distinguir dos componentes morfológicos principales (Planicie costera y Llanura alta) y otro que ensambla a los anteriores (Escalón). La **Planicie costera** (Auge, 1990) que ocupa 318 km², se extiende en forma de faja paralela a la costa del Río de la Plata, en un ancho de 6 a 10 km, constituyendo un ámbito casi sin relieve, entre cotas 5 y 0 m (figura 6), lo que limita notoriamente el flujo superficial. Lo antedicho da lugar a la formación de un ambiente mal drenado, de tipo cenagoso, con agua subterránea aflorante o a muy poca profundidad (generalmente a menos de 1 m), donde predomina notoriamente la dinámica vertical sobre la lateral, lo que hace que funcione como el principal ámbito de descarga subterránea natural de la región. Otra característica distintiva de la Planicie costera es el control que ejerce sobre la salinidad del agua subterránea asociada, presentando elevada salinidad en el Acuífero Pampeano, condición que se acentúa en el Acuífero Puelche, dado que en algunos sitios este último posee un tenor salino similar al del agua de mar. La **Llanura alta**, denominada así por su posición topográfica más elevada respecto a la Planicie costera, se desarrolla en una superficie de 689 km², entre cotas 30 y 10 m. Presenta ondulaciones muy suaves originadas por la erosión fluvial y una pendiente topográfica dominante hacia el NE de 1,3 m/km. Las condiciones morfológicas y geológicas que caracterizan a esta llanura, ejercen notable incidencia en la dinámica y en la química del agua subterránea. Así, en relación a la primera, conforma un ambiente donde domina la infiltración o la recarga, particularmente en las divisorias de aguas superficiales. Respecto a la salinidad, prácticamente toda el agua subterránea de la Llanura alta es de bajo contenido salino (menos de 1 g/l), tanto en el Acuífero Pampeano como en el Puelche. El **Escalón** conforma el ámbito de ensamble entre la Llanura alta y la Planicie costera y se desarrolla aproximadamente entre las isohipsas de 5 y 10 m,

manifestándose con mayor claridad entre la ciudad de La Plata y el extremo NO de la región estudiada. Arealmente ocupa sólo 43 km² y por ello no ejerce mayor control en el comportamiento de las aguas superficiales ni subterráneas.

HIDROGRAFÍA.

Las cuencas hidrográficas presentan características muy diferentes de acuerdo al ámbito morfológico en que se desarrollen. En la Llanura alta, tienen bordes bien definidos y los colectores principales presentan trayectorias relativamente rectas, con cauces menores que rara vez superan los 5 m de ancho. Los cauces mayores o llanuras de inundación, por su parte, pueden alcanzar hasta unos 500 m de ancho (A° El Pescado). En la Planicie costera los cauces se tornan divagantes, perdiéndose en el bañado. La mayoría de los arroyos es de tipo perenne o permanente en sus tramos inferiores, por el aporte subterráneo, mientras que en los medios y altos se transforman en intermitentes. Al carácter de influencia de las aguas superficiales sobre las subterráneas contribuye en gran medida la explotación, particularmente la que se efectúa en la ciudad de La Plata (figura 7). Se efectuaron aforos en siete de las nueve cuencas hidrográficas, obteniéndose caudales medios entre 30 y 70 l/s, con índices de escurrimientos extremos de 3,9% (A° Pereyra) y 9,1% (A° Maldonado). Considerando el promedio de los arroyos aforados, excluidos El Pescado y del Gato, el índice de escurrimiento es del 6,2% respecto a la lluvia. Un valor similar (5%) fue el que adoptó Auge (1991) para desarrollar el balance hídrico de La Plata. En virtud de lo expuesto, se toma como magnitud indicativa para el escurrimiento fluvial al 5% de la lluvia.

CLIMA.

En ámbitos de llanura como el estudiado, la precipitación presenta una variabilidad espacial y temporal mucho más marcada que la temperatura y por ello, es necesario disponer de series prolongadas para lograr una caracterización del clima sobre la base de valores medios. Para la caracterización climática se emplearon los registros de la Estación Climatológica La Plata - Observatorio Astronómico, ubicada a 34° 55' de latitud S y 57° 56' de longitud O y a cota 15 m. **Precipitación.** Tomando los valores medios, la precipitación anual en el período 1909/92 fue de 1.020 mm; el mes más lluvioso marzo (110 mm) y el menos lluvioso junio (62 mm). Para valores absolutos, el año de mayor precipitación fue 1914 (1.926 mm) y el más seco 1916 (416 mm), mientras que a nivel mensual, el de mayor registro fue abril/59 (356 mm) y el menor, julio/16 (0 mm).

Temperatura. De los registros obtenidos en la Estación Climatológica La Plata, se obtiene una temperatura media anual de 16,0° en el período 1909/92, con enero como el mes más cálido (22,5° C) y julio como el más frío con 9,7° C.

BALANCE HÍDRICO.

El balance hídrico se desarrolló con dos alcances. Uno global para cuantificar las variables primarias y resolver la ecuación generalizada del ciclo hidrológico y el segundo para establecer las entradas y las salidas al y del sistema subterráneo. Para estimar la evapotranspiración real (Etr) se utilizó la metodología desarrollada por Thornthwaite et al (1957), considerando una capacidad de campo de 200 mm en virtud del suelo y vegetación dominantes. Tomando los valores medios mensuales de lluvia y temperatura, para el lapso 1909/92 y, considerando un paso anual, surge una Etr de 780 mm/año que representa el 98,6% de la evapotranspiración potencial (791 mm/a), lo que indica una ínfima deficiencia en el balance hídrico. Los excedentes en cambio llegan a 240 mm/a, el 23,5% de la precipitación media anual (1.020 mm), lo que indica condiciones favorables para la recarga subterránea. También se estimó la Etr para el período 1909/92, empleando un programa de paso mensual continuo con el que se obtuvo un total de 61.139 mm para Etr, que dividido los 84 años considerados, arroja un valor medio anual de 728 mm. El resultado del **balance hídrico generalizado**, para el lapso 1909/92, expresado en mm es el siguiente:

$$I = P - Etr - Ef$$

$$20.265 = 85.688 - 61.139 - 4.284$$

O sea, que en relación a la precipitación (P) se tiene:

$$Etr = 71\% \quad \text{infiltración} = 24\% \quad \text{escurrimiento fluvial} = 5\%$$

Del análisis realizado previamente surge que los excedentes superan con amplitud a los déficit hídricos. Para desarrollar el **balance hídrico subterráneo** es necesario considerar las pérdidas naturales y artificiales que se producen en el sistema; de acuerdo a la ecuación de continuidad se tiene:

$$E - S = \pm \Delta V$$

E: entradas S: salidas ΔV : variación del volumen almacenado

El período elegido para el balance fue 1973/92, debido a que en dicho lapso se han mantenido, con pocas variaciones, los caudales que se extraen en la actualidad. En lo referente al ámbito considerado, se tomó el de influencia generado por el cono de depresión de La Plata, en virtud de ser el más afectado por la explotación (29.000 ha) (figura 7). En el ámbito rural cultivado, donde se riega exclusivamente con agua subterránea, se produce un retorno importante, debido a la baja eficiencia del riego, estimado en un 50% del agua empleada; este volumen se traduce en recarga para los acuíferos Pampeano y Puelche. Otro aporte importante al sistema subterráneo, proviene de las pérdidas en las cañerías de conducción de agua potable, especialmente en La Plata donde son más antiguas. En este sentido, si bien no se conoce con certeza la magnitud de las fugas, por similitud con otros centros urbanos, puede asumirse para el índice de pérdida un 15% del total conducido y dado que este es de unos 100 hm³/año, las fugas alcanzarían a unos 15 hm³/a que prácticamente en su totalidad retornan al subsuelo. Las otras actividades que consumen agua subterránea no lo hacen en cantidades importantes. Así, los 108.000 habitantes carentes de agua potable utilizan unos 2 hm³/a, de los cuales un 80% aproximadamente retorna al Acuífero Pampeano, dado que también carecen de desagües cloacales (Auge et al, 1989). La industria extrae 1,5 hm³/a y el ganado, unas 6.000 cabezas en el ámbito considerado, consume alrededor de 0,6 hm³/a (Auge 1997). Las variables que representan ingresos y salidas al y del sistema subterráneo, para el lapso 1973/92, en el ámbito de llamada del cono de depresión de La Plata, aplicadas a la ecuación de continuidad brindan:

$$2.474 - 2.472 = 2 \text{ hm}^3/20 \text{ años}$$

Por lo tanto, el excedente subterráneo fue de sólo 2 hm³, lo que indica equilibrio entre entradas y salidas, hecho corroborado por la estabilidad de la superficie piezométrica del Acuífero Puelche en dicho lapso en La Plata.

AGUA SUBTERRÁNEA.

La relación hidráulica entre los acuíferos Pampeano y Puelche, fue demostrada por Auge (1986) para la Cuenca del Río Matanza y dado que sus características geológicas, morfológicas e hidrogeológicas son muy similares a las del ámbito estudiado, se puede aplicar el mismo modelo conceptual, cuya importancia radica en que explica con certeza, la forma en que se recarga y descarga naturalmente el Acuífero Puelche. Además el

funcionamiento hidráulico citado, que se reproduce en la figura 2, pudo comprobarse mediante registros de nivel realizados en piezómetros de diferente profundidad. La comunicación entre ambos acuíferos, a través del acuitardo cuando este se presenta, o en forma directa cuando está ausente, permite que el Puelche se recargue por filtración vertical descendente, en aquellos sitios donde el Pampeano presenta mayor potencial hidráulico (divisorias subterráneas) o se descargue por filtración vertical ascendente, donde presenta menor potencial hidráulico que el Puelche (zonas de descarga). En definitiva este funcionamiento con comunicación hidráulica vertical, origina potenciales muy similares entre ambos acuíferos, similitud que también caracteriza a la salinidad y a la composición química de sus respectivas aguas, fundamentalmente en la Llanura alta, donde la diferencia más notoria radica en el mayor contenido en calcio del agua del Pampeano respecto al Puelche (Auge, 1996). Con el objeto de precisar los parámetros hidráulicos del Acuífero Puelche, se realizaron 26 ensayos de bombeo en otras tantas perforaciones afectadas al suministro de agua potable, en las que no se dispuso de pozo de observación y 4 en otros pozos privados, en los que sí se contó con pozo de observación. Los valores extremos de caudal fueron 30 y 160 m³/h y el medio 84 m³/h, mientras que los caudales específicos llegaron a 1,3 m³/h.m y a 15,4 m³/h.m y el medio a 7,1 m³/h.m. Se determinaron las siguientes transmisividades extremas: 1.405 m²/d y 115 m²/d, con un valor medio de 550 m²/d, de las que surgieron, considerando los espesores, permeabilidades (mínima 9 m/d, máxima 57 m/d, media 30 m/d). En los 4 ensayos donde se dispuso de pozo de observación se obtuvieron los siguientes promedios: transmisividad vertical (T') 4,5.10⁻⁴ día⁻¹ y coeficiente de almacenamiento (S) 1,7.10⁻³.

Recarga. La estimación de la infiltración o recarga del Acuífero Pampeano, se citó en el punto balance hídrico generalizado, donde se llegó a la conclusión que en el lapso 1909/92 la infiltración fue del orden de 20.000 mm (240 mm/año), lo que representa un 24% de la precipitación en dicho período (85.000 mm). Ya se mencionó el mecanismo de recarga del Puelche a partir del Pampeano sobrepuesto. Dado que la superficie piezométrica no ha sufrido variación significativa en los últimos 50 años, resulta evidente que el Acuífero Puelche recibe una recarga equivalente a la extracción efectiva, estimada en 62 hm³/año de acuerdo a la siguiente distribución:

agua potable 35, riego 25, industria y otros 2

A la extracción para agua potable (50 hm³/a) hay que deducirle 15 hm³/a por pérdidas del total de agua circulante en cañerías y a la efectuada para riego (70 hm³/a),

hay que quitarle un 50% por retorno debido a la baja eficiencia y, de los 35 hm³/a efectivamente extraídos, aproximadamente un 70% proviene del Puelche (25 hm³/a) y el resto del Pampeano. Para que el Acuífero Puelche reciba dicho volumen desde el Pampeano (62 hm³/a), se requiere una diferencia media de potencial hidráulico de alrededor de 1,2 m a favor de este último, en las 29.000 hectáreas que componen el área de llamada del cono de depresión de La Plata.

$$\Delta h = Q/(T \cdot A) = 170.000 \text{ m}^3/\text{d} / (5 \cdot 10^{-4} \text{ día}^{-1} \cdot 29.000 \cdot 10^4 \text{ m}^2) = 1,17 \text{ m}$$

Esta magnitud así como la respuesta de los niveles hidráulicos ante los excesos y déficit hídricos y la relación entre los potenciales de los acuíferos Pampeano y Puelche, pudieron verificarse mediante mediciones piezométricas mensuales realizadas en una batería para monitoreo. **Dinámica.** La figura 7 reproduce la red de flujo subterráneo a partir de los registros realizados en 118 pozos entre agosto y octubre/90. En el mismo resalta el cono de depresión de La Plata, cuyo ápice se ubica en el Parque San Martín, con un potencial hidráulico de -12,7 m en el Acuífero Puelche. El cono, de forma subcircular hasta la equipotencial de -5 m, asume una disposición subelíptica en coincidencia con la equipotencial de 0 m, con un mayor elongamiento en dirección ONO-ESE. En lo referente a su extensión areal, a nivel de la equipotencial de 0 m, el cono sólo ocupa 53 km² pero el ámbito de su llamada crece a 290 km² (figura 8). Los menores gradientes hidráulicos de la Llanura alta, se aprecian en la cuenca del A° El Pescado con 0,55 m/km y los más fuertes en el ámbito del cono de depresión 17 m/km. En las cuencas de los arroyos menores, el gradiente hidráulico asume un valor intermedio (1,6 m/km). En función de los gradientes hidráulicos citados y de las permeabilidades y porosidades efectivas de los acuíferos Pampeano y Puelche, aplicando Darcy, se obtuvieron las siguientes velocidades efectivas de flujo:

	PAMPEANO		PUELICHE	
Máxima	1,0	m/día	6,5	m/día
Mínima	5,5.10 ⁻³	"	0,02	"
Media	0,1 m/día	"	0,2	"

Por lo tanto, las velocidades efectivas de flujo en el Acuífero Puelche varían entre 2 cm y unos 6 m/día y en el Pampeano entre 5 mm y 1 m/día. Para el cálculo del caudal

que ingresa al cono de La Plata, se tomó la equipotencial de 0 m y los gradientes hidráulicos respecto a la de 5 m (figura 7). La transmisividad se eligió en función del valor medio derivado de los 26 ensayos de bombeo (550 m²/d). La equipotencial de 0 m tiene una longitud de 32.000 m y el gradiente hidráulico medio ponderado entre ésta y la de 5 m es 6,0.10⁻³; por lo tanto el caudal que atraviesa el tramo es:

$$Q = 550 \text{ m}^2/\text{d} \cdot 6,0 \cdot 10^{-3} \cdot 32.000 \text{ m} = 106.000 \text{ m}^3/\text{día} \text{ (38,7 hm}^3/\text{año)}$$

A un valor algo más bajo (33,2 hm³/a) llegó Auge (1991), empleando una cartografía de menor detalle. Si se compara la magnitud del flujo subterráneo con la extracción del Acuífero Puelche para la provisión de agua potable a La Plata, surge una diferencia de unos 11 hm³/año, dado que el bombeo actual es de aproximadamente 50 hm³/año, mediante 85 pozos, la mayoría de los cuales se ubican dentro de la equipotencial de 0 m. Considerando las fugas en las cañerías de agua potable, estimadas en unos 15 hm³/a y dado que prácticamente la totalidad de las pérdidas se producen en el subsuelo, dicho caudal se transforma en recarga. Por lo tanto, deduciendo este monto del total, se llega a una extracción efectiva de 35 hm³/año. Curioso es el comportamiento hidrodinámico de la región cultivada, que ocupa unas 17.000 hectáreas de las cuales 13.000, se ubican dentro del ámbito de llamada del cono de depresión de La Plata (figura 8). En esta zona se cultivan hortalizas y flores que se riegan exclusivamente con agua subterránea entre octubre y marzo. Ya se indicó que la mayoría de los pozos para riego, alcanzan la sección superior del Acuífero Puelche y como no están encamisados, captan también del Pampeano sobrepuesto. Dado que con una perforación se pueden regar aproximadamente 5 ha, el número de pozos en las 13.000 ha contenidas en el área de llamada, es de unos 2.600. El caudal medio, en virtud del diseño del pozo y del tipo de bomba empleada, es de 30 m³/h y normalmente se riega durante 10 horas, día por medio. Considerando estos valores, se tiene que la extracción anual para riego es de unos 70 hm³, de los cuales un 70% aproximadamente provienen del Acuífero Puelche (49 hm³/a) y el 30 % restante del Pampeano (21 hm³/a). Pese a la magnitud de la extracción, no se presenta ningún cono de depresión en la zona cultivada y sólo se insinúa una vaguada hidráulica entre las equipotenciales de 15 y 5 m. Este aparente contrasentido deja de serlo, si se tiene en cuenta que la mayor parte del riego se hace por surco, lo que deriva en un retorno importante por infiltración, aproximadamente el 50%. En los últimos años se han implementado sistemas de riego por aspersión y goteo, lo que deriva en una menor demanda y por ende, la tendencia futura es a que disminuya la extracción. En lo referente

al flujo vertical, las variaciones en la posición de superficie hidráulica de los acuíferos Pampeano y Puelche, se estudiaron a partir de los registros realizados en 50 pozos que integraron una red de monitoreo, entre agosto/90 y marzo/93. El análisis estadístico de los niveles, indicó la existencia de una época con potenciales hidráulicos máximos (set/91), otra con valores medios (jun/91) y finalmente una tercera con valores mínimos (feb-mar/92). En función de ello y empleando mapas con curvas de isovariación, se estimó un incremento del volumen almacenado de 39,4 hm³ entre junio y setiembre/91. Si se compara este flujo vertical producido en sólo 3 meses, respecto al lateral anual calculado para el Acuífero Pampeano (4,0 hm³), surge claramente el neto predominio de los movimientos verticales (91% del total) sobre los laterales (9%).

Reserva. Para la estimación del volumen de agua almacenada en los acuíferos Pampeano y Puelche, se tomó para el primero el espesor saturado, corregido en función del índice 0,7 que representa en forma aproximada, la sección efectivamente productiva y una porosidad eficaz de 0,08. Para el Puelche se consideró la potencia de la unidad, dado que está totalmente saturado y es productivo en todo su espesor. Los cálculos están referidos a la Llanura alta, pues en la costera, ambos acuíferos tienen elevada salinidad. En el **Pampeano**, la reserva geológica o efectiva, para una superficie de 600 km² es de unos 1.200 hm³. Por lo tanto, el espesor medio productivo es de 25 m y el saturado de 36 m. Para el **Acuífero Puelche** se empleó la figura 5, donde se representan las variaciones de su espesor, adoptando una porosidad efectiva media de 0,2. En el ámbito considerado (700 km²), el volumen total del acuífero (agua + sólido) es de unos 14.155 hm³, lo que brinda una potencia media de 20 m. Dicha magnitud multiplicada por la porosidad efectiva (0,2) resulta en una reserva geológica de 2.830 hm³, valor que supera en 2,36 veces a la del Pampeano. A la reserva geológica del Puelche, hay que agregarle la que se presenta bajo confinamiento parcial, que surge de considerar el coeficiente de almacenamiento y la altura de la superficie piezométrica por encima del techo del acuífero y que representa unos 105 hm³ adicionales. Por lo tanto, la reserva total del Puelche es de unos 2.935 hm³. Es importante señalar que desde el inicio de la explotación en 1885 hasta el presente, se extrajeron del Acuífero Puelche 2.700 hm³, sólo para consumo humano. Esta magnitud casi duplica a la reserva total del acuífero, dentro del ámbito influenciado por el cono de depresión de La Plata (1.410 hm³). Por ello, no cabe ninguna duda de que el mismo se recargó durante dicho lapso a un ritmo equilibrado con la descarga artificial, pues de lo contrario el agotamiento hubiese sido significativamente mayor, o total.

Explotación actual. Ya se mencionó que la extracción para la provisión de agua potable

a la ciudad y al Gran La Plata, se efectúa mediante 85 pozos que captan del Acuífero Puelche a razón de unos 50 hm³/a, lo que brinda un caudal medio individual de 67 m³/h. Otros 50 hm³/a, aproximadamente, provienen del Río de la Plata, por lo que el consumo global asciende a 100 hm³/a (3,2 m³/s). Dado que la población servida en el ejido urbano de La Plata y localidades vecinas es de 404.000 habitantes, la dotación individual es de 575 l/hab.día si se deducen los 15 hm³/a por fugas. Los habitantes carentes de agua de red (108.000), se abastecen fundamentalmente con bombeadores eléctricos y bombas manuales. Adoptando para este sector una dotación de 50 l/hab.día, se tiene un consumo medio de 2 hm³/a. Dentro del rubro industrial, los mayores consumidores de agua se ubican en la Planicie costera y utilizan la del Río de la Plata, debido a que la subterránea tiene alta salinidad. En la Llanura alta, donde el agua subterránea es apta, la actividad industrial es mucho menor y por ende el consumo, que se estima en 1,5 hm³/a. El ámbito rural cultivado, es el mayor usuario de agua subterránea (70 hm³/a) de los que aproximadamente 49 hm³/a provienen del Acuífero Puelche y 21 hm³/a del Pampeano. En el ámbito rural donde se practica agricultura extensiva y pastoreo, prácticamente no se riega y aquí, el mayor consumidor de agua es el ganado, que utiliza 0,6 hm³/a de agua subterránea. Sintetizando, la extracción total de agua subterránea en la región estudiada, asciende a unos **124 hm³/a. Química.** Ya se mencionó que la comunicación entre los acuíferos Pampeano y Puelche, no sólo derivaba en potenciales hidráulicos similares, sino también en una marcada semejanza en la salinidad y composición química de sus aguas, particularmente en la Llanura alta. Dado la restricción a 20 páginas establecida en la norma del Congreso, sólo se hará referencia detallada al residuo seco y a los nitratos porque son dos de los componentes que ejercen mayor limitación en la potabilidad, al resto se lo tratará en forma general. El **residuo seco** (RS) o salinidad total resulta un factor trascendente, debido a que prácticamente todas las normas vigentes en el mundo, lo consideran como uno de los limitantes de la potabilidad. En este caso se utilizarán las normas de potabilidad de Obras Sanitarias de la Provincia de Buenos Aires, que fija 2.800 mg/l como límite superior de salinidad total. La región con menor residuo seco se emplaza en la Llanura alta, con una notoria predominancia de valores entre 500 y 1.000 mg/l (figura 9). En ella, solamente un pozo con 3.531 mg/l supera dicho valor en la Llanura alta donde, además, se destaca la escasa variación en el contenido salino del agua subterránea, aún en muestras provenientes de diferentes acuíferos (Pampeano y Puelche). No se aprecia una clara correspondencia entre las direcciones de flujo y el incremento salino e incluso, en algunos casos, esta relación se invierte. Lo antedicho

demuestra la existencia de recarga distribuida en la mayor parte del área. De esta forma, si bien hay concentración a lo largo del recorrido, también se produce dilución por infiltración in situ. En La Plata se aprecia una saliencia de la curva de 1.000 mg/l (figura 9), por el desplazamiento hacia el SO del agua salada subyacente a la Planicie costera, debido al sobrebombeo a que estuvieron y aún están sometidos los pozos de la ciudad. Justamente en la Planicie costera, se presentan los mayores valores de RS con 20 g/l. De lo expuesto se desprende que la totalidad de la Llanura alta junto con el Escalón (730 Km²), presentan agua subterránea apta para el consumo humano, en relación a la salinidad total. El resto (Planicie costera) posee agua subterránea inapta, salvo en los albardones costeros formados por conchilla. Los **nitratos**, que constituyen la forma más oxidada, estable y móvil de la materia nitrogenada en solución, generalmente provienen de: fijación natural, especialmente por las legumbres; degradación de materia orgánica; contaminación urbana, rural e industrial y abonos agrícolas. En la figura 10 se aprecia la distribución areal de los NO₃⁻ en los acuíferos Pampeano y Puelche. En la zona rural no cultivada se presentan algunos valores sumamente elevados (mayores de 200 y aún de 450 mg/l). Sin embargo, la contaminación es de tipo puntual y se debe a la cercanía de las captaciones (bombas manuales y molinos), la mayoría terminadas en el acuífero freático, a los pozos ciegos de uso doméstico y también a los corrales. En la zona rural cultivada se presentan algunos altos aislados con más de 90 mg/l. La existencia de una faja con menos de 45 mg/l de NO₃⁻, que se ubica entre la periferia de La Plata y la zona cultivada, es un indicio claro de que la contaminación no proviene del ámbito rural, hipótesis que fue sostenida por algunos investigadores en virtud de las direcciones dominantes del flujo subterráneo. Además, se produce un marcado incremento desde el SO hacia el NE de la ciudad, pues de valores comprendidos entre 45 y 90 mg/l, se pasa a otros superiores a 90 y aún a 120. En relación a este tema, Auge et al, 1996 señala que más de las 2/3 partes del ejido urbano de La Plata, presenta tenores superiores a 90 ppm de NO₃⁻ en el agua del Puelche, que proviene de: pérdidas en la red cloacal; el aporte de antiguos pozos ciegos; la migración desde un viejo basural. Del muestreo y determinación de NO₃⁻ en 23 pozos ubicados dentro del ejido urbano de La Plata, surge que: la concentración media es de 77 mg/l; 21 pozos superan 45 mg/l, que es el límite de potabilidad adoptado por OSBA y sólo 2 están por debajo. De los 21 pozos citados, 15 presentan tenores entre 45 y 90 mg/l y 6 tienen más de 90 mg/l de NO₃⁻. El deterioro del

agua subterránea por nitratos es una característica que distingue a la mayoría de los grandes centros urbanos, como el Conurbano Bonaerense y a las ciudades de Lima, México y Sao Paulo, entre otras. En el caso que nos ocupa la contaminación urbana es más grave que la rural, pues no es de tipo puntual sino difundida y debe su origen a la migración del agua con NO_3^- contenida en el Pampeano hacia el Puelche, a través del acuitardo. Esto se produce por la disminución del potencial hidráulico del Puelche debido a la extracción. La situación mencionada, inhibe la construcción de nuevos pozos en la zona urbana. Respecto al resto de los componentes, y dentro de la Llanura alta, los valores más frecuentes son: **alcalinidad** (entre 200 y 400 mg/l de CO_3Ca - 4 y 8 meq/l); **dureza** (entre 100 y 200 mg/l de CO_3Ca); **cloruros** (menor de 100 mg/l < 2,8 meq/l); **sulfatos** (menor de 100 mg/l < 2,1 meq/l); **sodio** (menor de 200 mg/l < 8,7 meq/l); **potasio** (menor de 20 mg/l < 0,5 meq/l), **calcio** (menor de 40 mg/l < 2 meq/l); **magnesio** (menor de 20 mg/l < 1,6 meq/l). En la Planicie costera se incrementan fuertemente los contenidos de todas las sustancias consideradas, salvo la alcalinidad que lo hace débilmente, de acuerdo a los siguientes valores: alcalinidad (400 a 800 mg/l de CO_3Ca), dureza (4 a 7 g/l de CO_3Ca); cloruros (4 a 20 g/l); sulfatos (1,5 a 17 g/l); sodio (1,5 a 4,5 g/l); potasio (50 a 200 mg/l); calcio (0,5 a 1,5 g/l); magnesio (600 a 800 mg/l). De lo expuesto se desprende que el agua subterránea de la Planicie costera resulta inapta para consumo humano, debido a exceso de salinidad, dureza, cloruros, sulfatos y sodio. También es inapta para otros usos como riego, industria y ganado, mientras que en general resulta apta para los usos mencionados, en la Llanura alta. En lo referente a contaminación con agroquímicos, se muestreó para identificar heptacloro, lindano, maneb, zineb, dimetoato, amonio y fósforo inorgánico, pero en todos los casos las concentraciones detectadas se ubicaron de uno a dos órdenes de magnitud por debajo de las normas establecidas por EPA para agua potable. **Explotación propuesta.** En este punto se propone la construcción de nuevos pozos para incrementar la captación, a fin de abastecer a la población carente de agua potable. Para la ubicación de la batería propuesta se tuvo en cuenta la aptitud del agua subterránea, tanto en lo referente a calidad, como a disponibilidad, productividad y renovabilidad. Finalmente, se desarrolló un modelo matemático en condiciones de régimen variable, con el objeto de predecir la evolución piezométrica, como consecuencia de la nueva extracción. Resulta evidente que el aprovechamiento racional de todo recurso natural, en este caso renovable como el agua, debe basarse en un conocimiento ajustado de sus características y

comportamiento, preferentemente bajo condiciones de no alteración, pues esto resulta la base para predecir los efectos que originará la acción humana sobre dicho recurso. Dos acciones artificiales son las que más inciden sobre la aptitud del agua subterránea (extracción y contaminación). La extracción muchas veces, como es el caso de La Plata, se inició en tiempos en que existía un desconocimiento generalizado sobre la hidrología subterránea. Esto hizo que los caudales se programaran en función de la demanda, pero fundamentalmente de acuerdo a lo que se entendía como productividad ideal, que derivaba de una concepción equivocada basada en que el ahorro era proporcional a la relación caudal - cantidad de pozos. Este principio, que en definitiva apunta al diseño y construcción de pozos que eroguen el máximo caudal posible, se impuso durante la primera mitad de este siglo y aún mantiene vigencia, especialmente entre los perforadores. Sin embargo los malos y con frecuencia desastrosos resultados obtenidos con esta técnica, junto con el avance en el conocimiento sobre el manejo de acuíferos, hizo que se modificara sustancialmente el concepto de aprovechamiento del agua subterránea. En este sentido, en la actualidad, prácticamente la totalidad de los especialistas se afana en establecer un caudal que asegure el menor deterioro posible en el comportamiento hidrodinámico natural, en las reservas y en la calidad del recurso. La magnitud de este caudal o caudal seguro (safe yield) depende de múltiples factores, pero uno de los que reviste mayor trascendencia apunta a evitar graves alteraciones en la relación entradas – salidas, al y del sistema hidrológico subterráneo. Precisamente este criterio es el que se empleó en este estudio, para elegir el caudal de la nueva batería de explotación. En lo referente a calidad ya se mencionó que existen dos tipos dominantes de contaminación en el agua subterránea estudiada. Uno, enteramente artificial, que afecta tanto al ámbito urbano como al rural y tiene al NO_3^- como el principal contaminante. El otro es de origen natural (agua subterránea salada en la Planicie costera), pero la contaminación (salinización) se indujo por una acción artificial (sobreeplotación del Acuífero Puelche en La Plata). A los tipos citados, hay que agregar un tercero de carácter potencial y es el que puede generar el uso de pesticidas en la zona rural cultivada. Respecto a esto ya se señaló que si bien no existen evidencias de deterioro en la calidad del agua subterránea a partir del empleo de heptacloro, lindano, dimetoato, maneb y zineb, el comportamiento citado no puede extenderse con total certeza al resto de los numerosos y variados plaguicidas y herbicidas que se usan en cantidades significativas. La zona rural cultivada fue uno de los ámbitos descartados para

la ubicación de los nuevos pozos, debido a la carga contaminante que indudablemente afecta al suelo, lo que evidentemente constituye un riesgo potencial para el agua subterránea, situación que se agravaría de incrementarse la explotación por el efecto acelerador en la migración vertical descendente de los contaminantes. A esta zona se la calificó como de riesgo potencial respecto a la contaminación (figura 11). Otros ámbitos desechados fueron los urbanizados, fundamentalmente por el alto contenido de NO_3^- y la Planicie costera, debido a la elevada salinidad del agua subterránea. En la figura 11, también se indica la posición de los 30 pozos integrantes de la batería propuesta, en un ámbito que prácticamente no está alterado por explotación, ni presenta actualmente riesgo de contaminación por actividades agrícolas. La elección del caudal para la batería, se realizó mediante la práctica de la prueba y error, con lo que se logró un caudal seguro de 2.160 m³/d (90 m³/h por pozo). Para la separación entre pozos se eligió 700 m, distanciamiento apropiado a fin de evitar excesos de depresión por interferencia y aprovechar de la mejor manera posible el espacio geográfico. Para el modelo de simulación se tuvo en cuenta el comportamiento de semiconfinado, con filtración vertical a través del techo (acuitardo), que caracteriza al Acuífero Puelche. La extensión del cono de depresión generado por el bombeo conjunto de los 30 pozos, a los 60 días continuados de bombeo, es de unas 23.000 hectáreas. El excedente hídrico en el lapso 1973/92 fue de 7.100 mm y si se le deduce el escurrimiento fluvial (5%), quedan 6.745 mm en condiciones de infiltrarse (337 mm/año) que representan un volumen 77,5 hm³/a. Este valor supera con amplitud al programado para la extracción de agua potable (23,7 hm³/a), más el que se emplea para riego en la fracción cultivada de las 23.000 ha ocupadas por el cono de depresión, y que es de unos 15 hm³/a. Dado que la extracción total es de 38,7 hm³/a el excedente neto alcanza a unos 39 hm³/a. Para la predicción se utilizaron los siguientes parámetros hidráulicos:

$$\mathbf{T=550\ m^2/d,\ S=5.10^{-3},\ T'=5.10^{-4}\ \text{día}^{-1},\ B=1.050\ m}$$

Bajo las condiciones señaladas la estabilidad de la superficie piezométrica del Acuífero Puelche se alcanzaría a los 60 días de extracción continuada, por aporte vertical descendente desde el Pampeano. Por lo tanto, en las condiciones mencionadas, aún sin considerar el retorno por la baja eficiencia del riego, la recarga del Pampeano cubre con amplitud el flujo hacia el Puelche, lo que asegura la estabilidad en los potenciales hidráulicos de ambos acuíferos y un aprovechamiento sustentable del Puelche.

CONCLUSIONES

El agua subterránea que se emplea actualmente para abastecer a la ciudad de La Plata, presenta un severo deterioro en su calidad debido a al elevado contenido en NO_3^- .

De los 23 pozos que operan en ejido urbano, 21 extraen agua con más de 45 mg/l de NO_3^- , que es el límite de potabilidad adoptado en Argentina.

Los NO_3^- provienen de: pérdidas en la red cloacal; antiguos pozos ciegos hoy desactivados; un viejo basural.

El deterioro en la calidad del agua urbana obligó a la búsqueda de otros sitios menos riesgosos frente a la contaminación, hecho que se logró mediante la investigación hidrogeológica de 105.000 ha. El lugar elegido se ubica a unos 15 km de la ciudad, donde se practica agricultura extensiva y ganadería, actividades que emplean bajas cantidades de agroquímicos y por ende son de escaso riesgo para la contaminación del agua subterránea.

Se propone la construcción de 30 pozos con los que podría abastecerse a unos 200.000 habitantes que actualmente carecen de agua potable.

El aprovechamiento sustentable frente a la explotación parece seguro toda vez que la recarga en el ámbito afectado por el bombeo es de unos 77 hm³/a, frente a la extracción prevista que sólo asciende a 39 hm³/a.

BIBLIOGRAFÍA

AUGE M. P. 1986 Hydrodynamic behavior of the Puelche Aquifer in Matanza River Basin. Groundwater. Vol. 25, N°5: 636-642. Dublin, Ohio.

AUGE M. P. y J. R. MUGNI 1989 Estudio hidrogeológico para el drenaje de Marcos Paz, Provincia de Buenos Aires, Argentina. II Conf. Latinoam. de Hidrogeol. Urbana. Actas: 34-56. Buenos Aires.

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. 1991 Sobreexplotación del Acuífero Puelche en La Plata, Argentina. IAH. XXIII Intern. Congress Proceed. T I, Vol. I: 411-415. Islas Canarias.

AUGE M. P. 1996 Similitudes hidrogeológicas entre los acuíferos Pampeano y Puelche en La Plata Argentina. II Seminario Hispano - Argentino de Hidrología Subterránea. Actas: 235-241. San Miguel de Tucumán.

- AUGE M. P. y M. I. NAGY 1996** Origen y evolución de los nitratos en el suelo y el agua subterránea de La Plata - Provincia de Buenos Aires - Argentina. 3er Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Actas: 1-12. San Luis Potosí. México.
- AUGE M. P. 1997** Investigación hidrogeológica de La Plata y alrededores. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires: 1-165. Buenos Aires.
- THORNTHWAITE C. W. y J. R. MATHER 1957** Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the water balance. Climate Drexel Inst. of Techn. N° 10: 185-311.

Figura 1

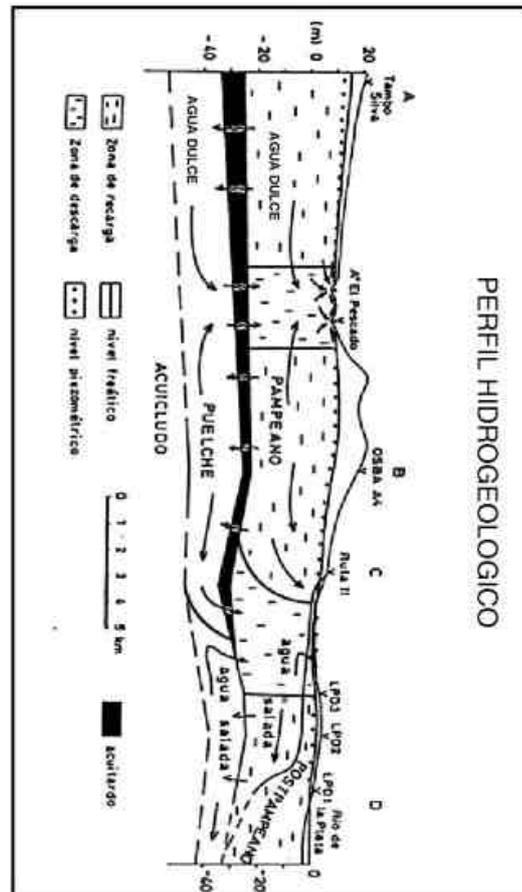


Figura 2

Figura 3

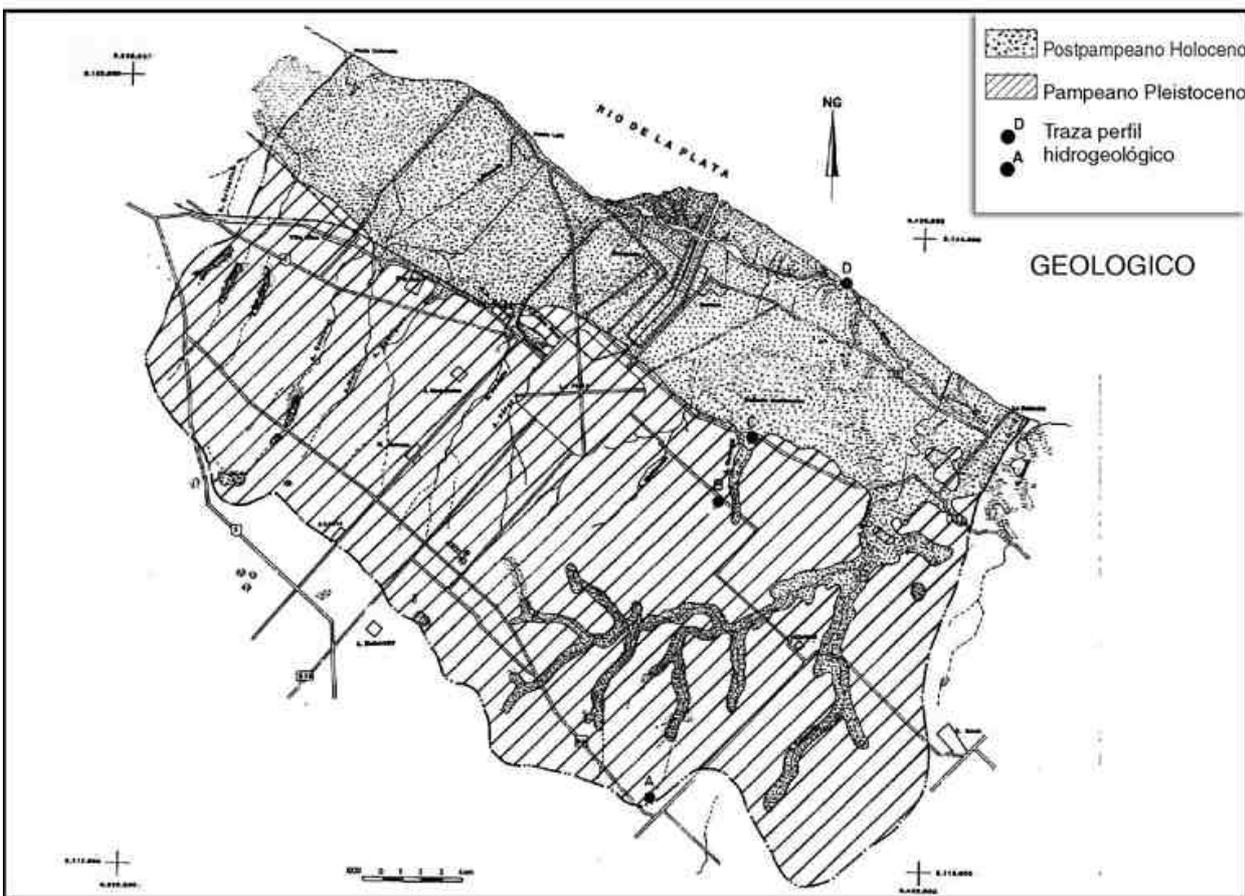


Figura 4

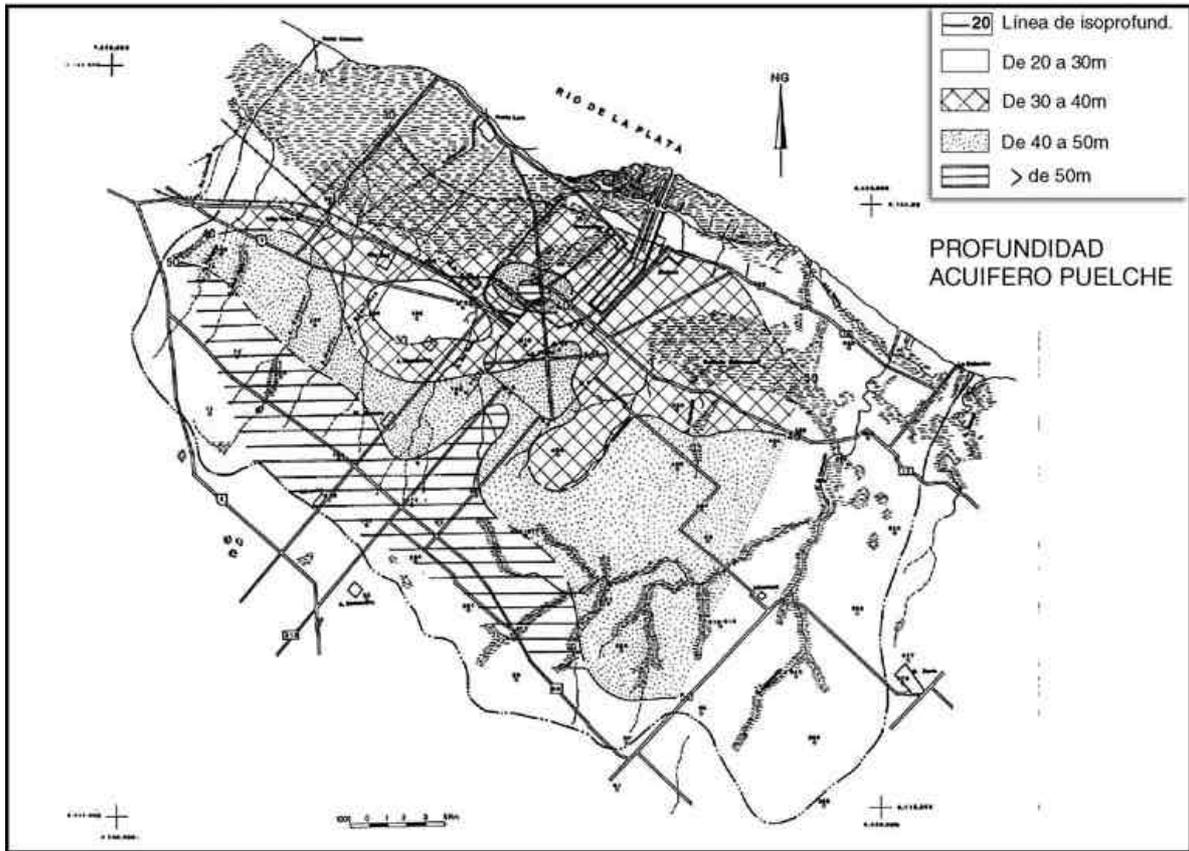


Figura 5

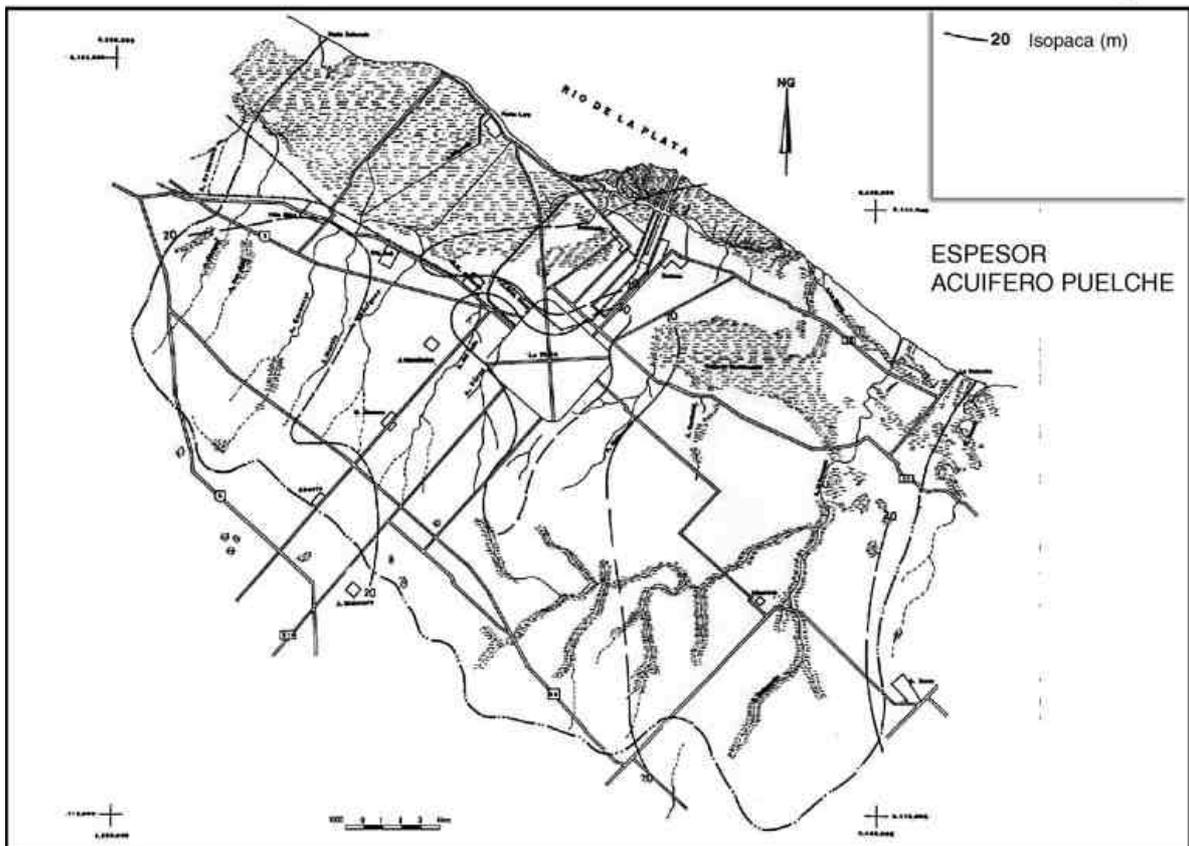


Figura 6

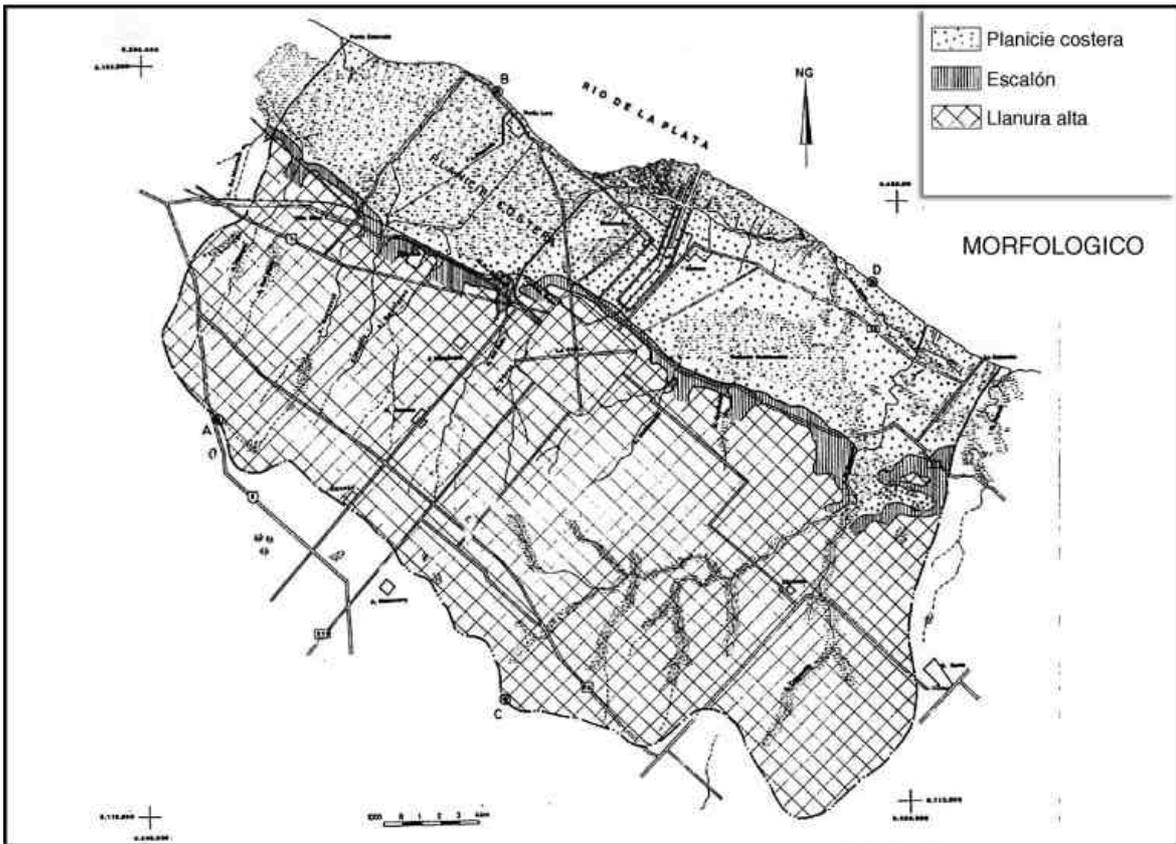


Figura 7

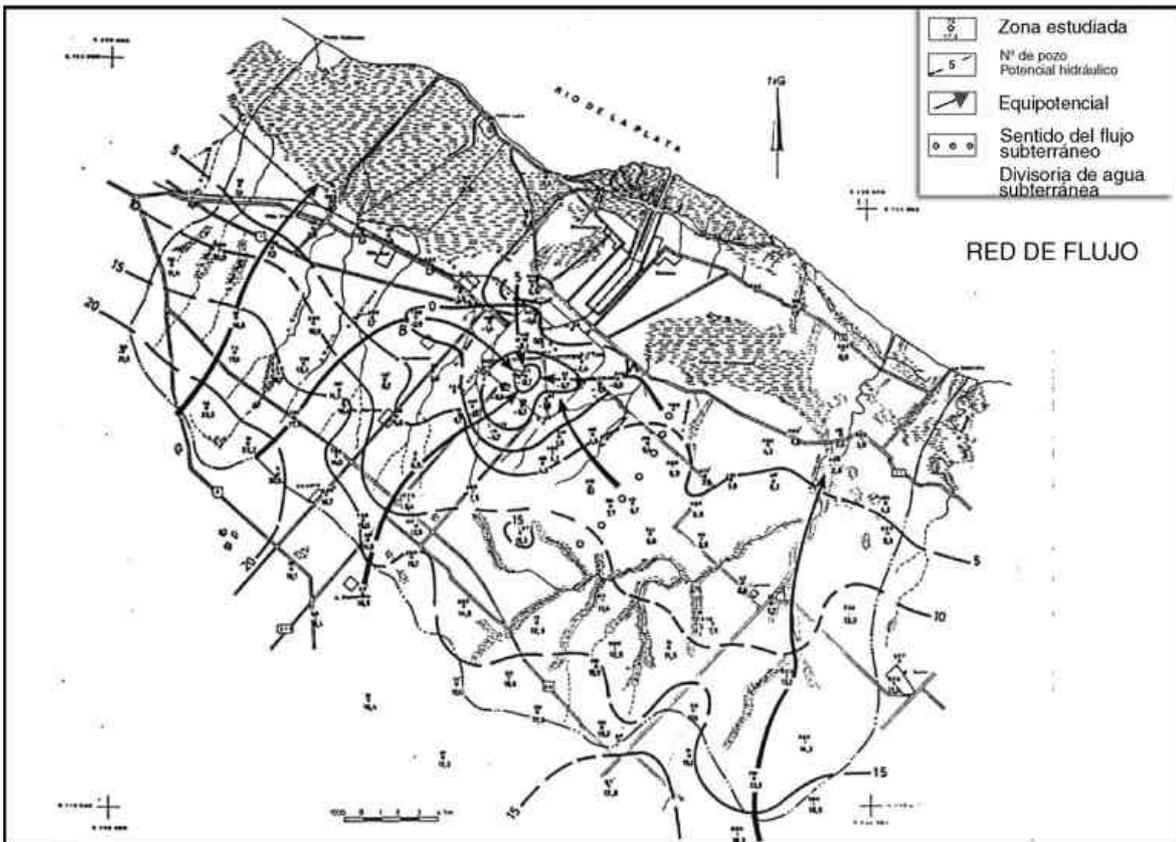


Figura 8

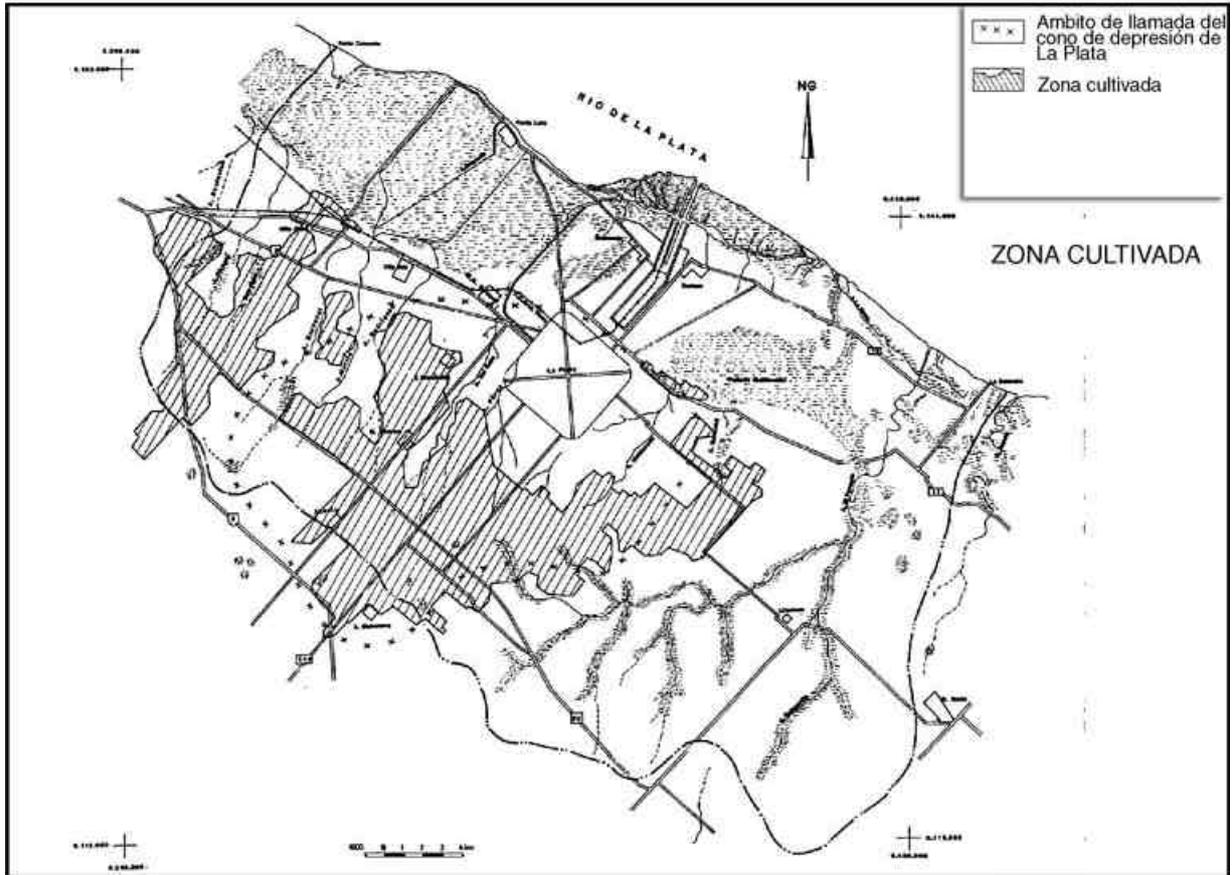


Figura 9

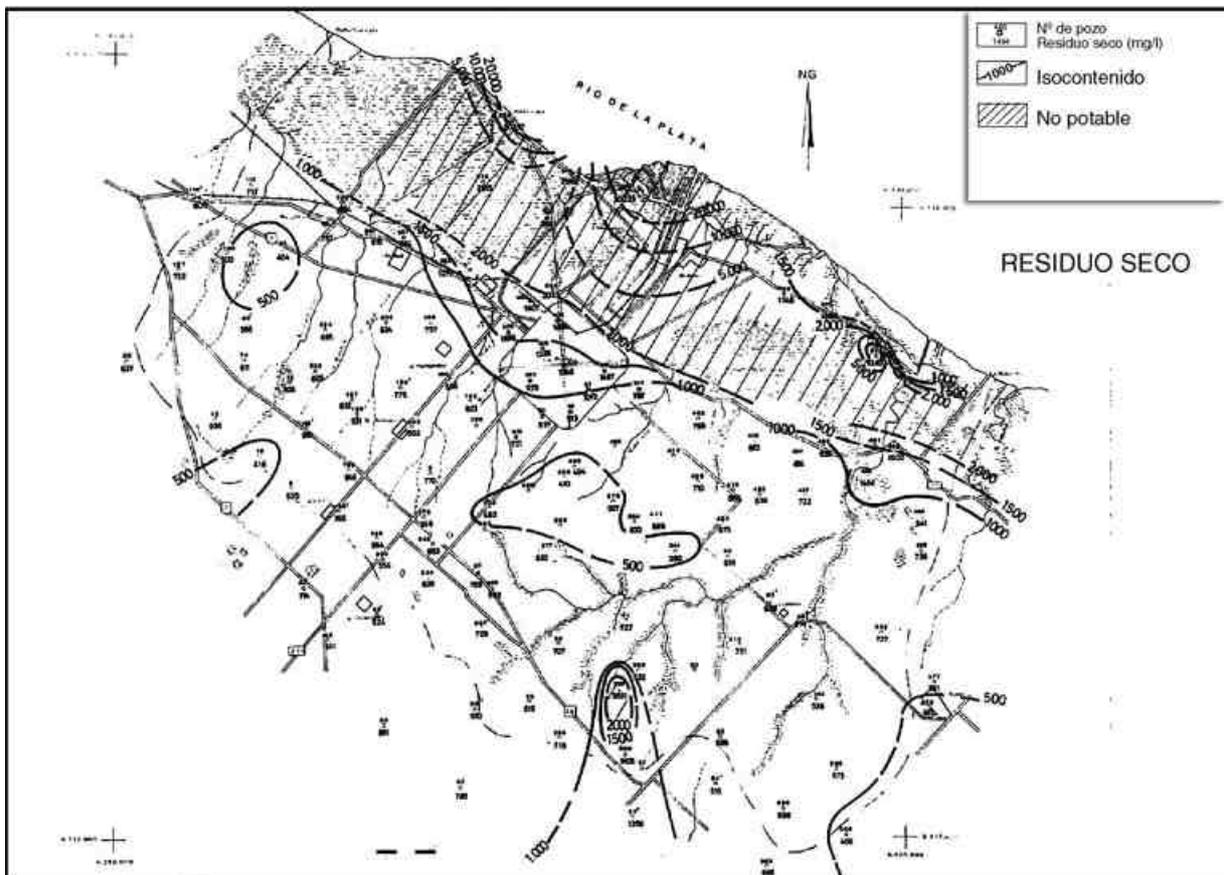


Figura 10

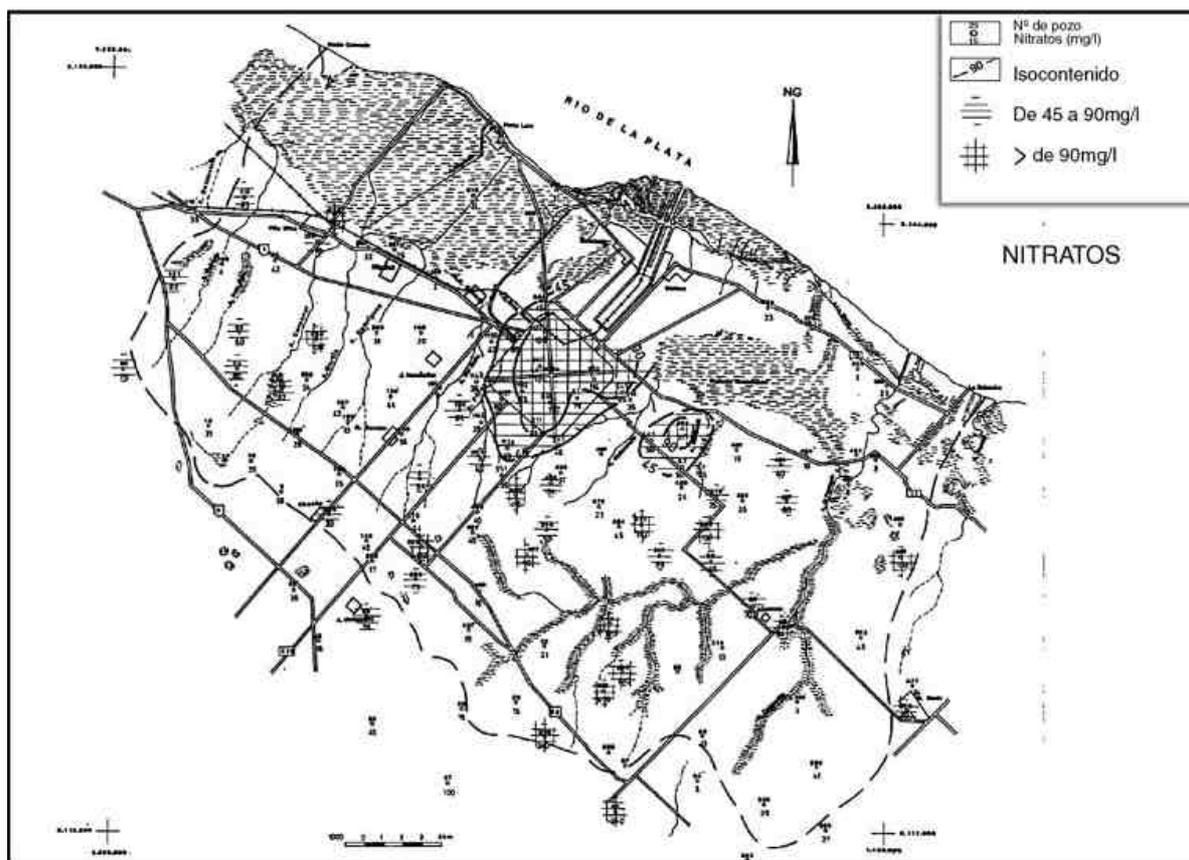


Figura 11

