

ACUÍFERO PUELICHE: INTRUSIÓN SALINA DE FONDO EN SAN LORENZO MODELIZACIÓN Y REVERSIÓN POR EFECTO DE BARRERA HIDRÁULICA NEGATIVA

Elio R. Mauro

Julio C. Sanchez

Dirección Técnica y Calidad, Empresa Aguas Provinciales de Santa Fe

ABSTRACT

The beginning of pumping for a new well of the Puelche aquifer, located in the city of San Lorenzo, was controlled. For a continuous pumping of 1050 m³/d, the conductivity progressively ascended from 1100 µS/cm stabilizing in 3250 µS/cm at 140 days of pumping. Such a process was attributed to the ascendant intrusive phenomena coming from the aquifer situated in the sands of the F. Paraná, a marine-origin formation underlying the F. Puelche, those which lack of defined and continuous hydraulic isolation in the area.

Acknowledged the sector in depth, by means of a poll with resistive-gamma natural logging, the modelation and calibration of the intrusive process was carried out by means of the Modflow-MT3D tools.

Due to the nature of the phenomenon (hydraulic decompression in the layer of fresh water and feeding from the layer of brackish water with further hydraulic relative potential) the generation of a negative bottom hydraulic barrier was projected through the pumping of the F. Paraná in the surroundings of the main well, simulating their operation with a new run of the model.

Finally, an essay was made pumping a complementary well which takes water from the F. Paraná, (480 m³/day with a conductivity of the order of 10 mS/cm), operation which reduced the salinity of the main pumping well until being stabilized in conductivities of the order of 1500 µS/cm, a result approximately concordant with that one obtained by the simulation.

RESUMEN

Se controló el inicio de bombeo de una nueva perforación al acuífero Puelche en la ciudad de San Lorenzo. Para un bombeo continuo de 1050 m³/d la conductividad ascendió progresivamente desde 1100 µS/cm estabilizándose en 3250 µS/cm a los 140 días de bombeo.

Se atribuyó dicho proceso a fenómenos intrusivos ascendentes provenientes del acuífero alojado en las arenas de la F. Paraná, formación de origen marino subyacente a la F. Puelche, las que en la zona carecen de aislación hidráulica definida y continua.

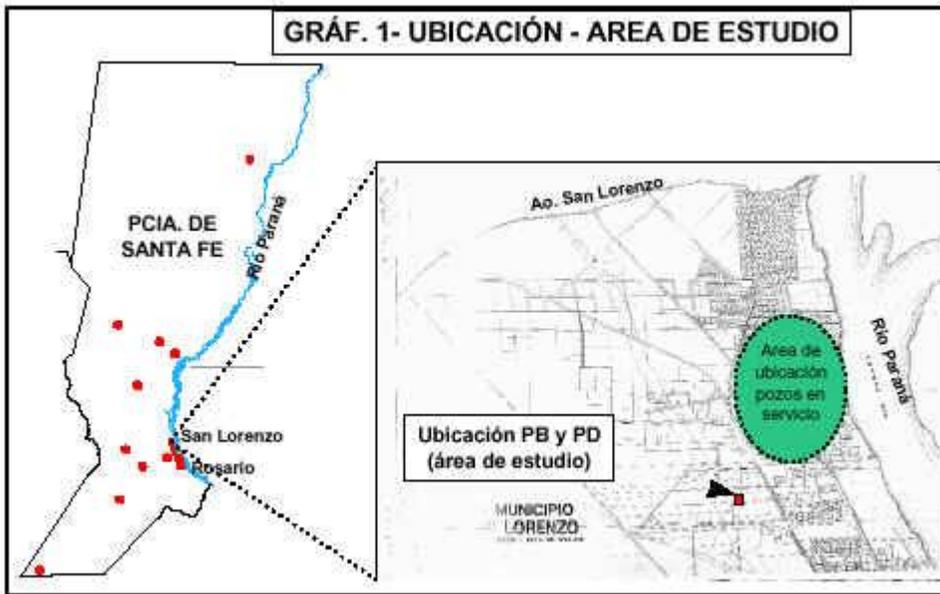
Reconocido el sector en profundidad, a través de un sondeo con perfilaje resistivo-gamma natural, se realizó la modelización y calibración del proceso intrusivo en tres dimensiones mediante las herramientas Modflow-MT3D.

Dada la naturaleza del fenómeno (descompresión hidráulica en la capa de agua dulce y alimentación desde la capa de agua salobre con mayor potencial hidráulico relativo) se proyectó la generación de una barrera hidráulica negativa de fondo a través del bombeo de la F. Paraná en las inmediaciones del pozo principal, simulando su funcionamiento con una nueva corrida del modelo.

Finalmente, se efectuó un ensayo bombeando un pozo complementario que capta aguas de la F. Paraná, (480 m³/día con una conductividad del orden de 10 mS/cm), lo que redujo la salinidad del pozo de bombeo principal hasta estabilizarse en conductividades del orden de 1500 µS/cm, resultado aproximadamente concordante con el obtenido por la simulación.

INTRODUCCIÓN - CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS GENERALES

La ciudad de San Lorenzo, situada a 20 km al Norte de Rosario, cuenta con una población servida de 20000 habitantes y configura un núcleo urbano-industrial importante del cordón fabril del Paraná. Se encuentra ubicada a orillas del Río Paraná, sobre la barranca en zona de erosión del curso, a una cota de 27 msnm, 20 m por sobre la cota promedio de su nivel.



El abastecimiento de agua para la población se realiza a partir de la captación de agua subterránea efectuada por 13 perforaciones de 45 m de profundidad promedio, cuyos filtros enfrentan al acuífero alojado en las arenas de la F. Puelche, con caudales promedio de 45 m³/h (1100 m³/día).

Las aguas producidas por estas perforaciones son del tipo sulfato-cloruro-bicarbonatadas sódicas con los siguientes contenidos promedio de los iones principales:

Parámetro	Concentración	Balance	
HCO ₃ ⁻	480 mg/l	7.87 meq/l	30.62 %
SO ₄ ²⁻	450 mg/l	9.37 meq/l	36.46 %
Cl ⁻	300 mg/l	8.46 meq/l	32.91 %
NO ₃ ⁻	23 mg/l	0.37 meq/l	0.01 %
Na ⁺	480 mg/l	20.88 meq/l	84.02 %
Ca ²⁺	35 mg/l	1.75 meq/l	7.04 %
Mg ²⁺	27 mg/l	2.22 meq/l	8.93 %
SDT	1900 mg/l		
Conductividad	2700 µS/cm		

Algunas de las perforaciones también han presentado contenidos elevados de Hierro (máximo 0,15 mg/l expresado como Fe total) y Manganeseo (máximo 0,23 mg/l).

La piezometría general revela un escurrimiento regional de sentido general Oeste-Este, descargando el sistema acuífero en el Río Paraná, con un gradiente hidráulico regional del orden de 1,5:1000.

SONDEO DE ESTUDIO - CONSTRUCCIÓN DEL POZO DE BOMBEO

A fines de 1997 se ejecutó una perforación adicional para reforzar el abastecimiento del sur de la ciudad, al SO de la misma.

Previamente, un sondeo de pequeño diámetro con perfilaje múltiple resistivo-gamma natural fue realizado con fines de estudio y de diseño de la perforación definitiva en vecindades de la ubicación prevista de la misma (gráf. 2 - pág. 5 - Perfilaje inicial).

El registro gamma natural, contrastado con muestreo de sedimentos en boca de pozo, marca una secuencia de limos Pampeanos hasta los 25 m de profundidad, arcillas limosas (acuitardo) entre 25 y 28 m, arcillas y arenas intercaladas entre 29 y 33 m, arenas limpias entre 33 y 45 m, finalizando con un ascenso de los registros entre 45 y 47 m provocado por la presencia de intercalaciones arcillosas en las arenas, donde finaliza el sondeo.

Los registros resistivos indican claramente la presencia de aguas de baja mineralización en los 10 m superiores de las arenas (45 ohm.m), las que se van salinizando en la medida que aumenta la profundidad.

La perforación de bombeo definitiva (PB) finalmente se ubicó a 80 m del sondeo inicial.

Fue construída en diámetro de 400 mm, con entubamientos de 200 mm y filtros ranura continúa de acero inoxidable de 200 mm, abertura 0,75 mm entre los 32 y 38 m de profundidad (lo más alejado posible de la interfase salina), con grabado del espacio anular hasta los 28 m y cementado desde allí hasta nivel de terreno. Un aforo de bombeo inicial de 12 hs de duración dió los siguientes resultados:

CUANTITATIVO		CUALITATIVO	
Nivel estático (mbnt)	17,045	Temperatura °C	19
Nivel dinámico (mbnt)	24,70	Conductividad (µS/cm)	1100
Descenso (m)	7,655	Alcalinidad total (mg/l CaCO ₃)	601
Caudal ensayo (m ³ /h)	34	Cloruros (mg/l)	40
Capac. Especif. (m ² /h)	4,44	Sulfatos (mg/l)	30
		Sodio (mg/l)	177
		Calcio (mg/l)	15
		Magnesio (mg/l)	10
		Nitratos	17
		Manganeso (mg/l)	< 0,03
		Fluoruros (mg/l)	0,8
		Arsénico (mg/l)	0,03

La conductividad del agua extraída permaneció constante durante este bombeo, por lo que se supuso que durante el transcurso del mismo provenía casi exclusivamente de los alrededores de los filtros, es decir de la porción superior del acuífero.

MEDIDAS DE CONTROL DEL BOMBEO

Previendo un ascenso de la salinidad del agua extraída por fenómenos intrusivos de fondo con la progresión del bombeo cuando la perforación ingresara en régimen de explotación, se dispusieron dos medidas de control:

1. seguimiento de los parámetros de la perforación en régimen (conductividad del agua, caudal de bombeo y nivel dinámico)
2. inicio de la modelización del proceso a escala local, avisados de la puntualidad del fenómeno intrusivo (efecto de buenas permeabilidades verticales en el acuífero) por un perfilaje resistivo realizado con anterioridad a 10 m de una perforación antigua con 30 años de bombeo continuo.

Para modelizar se utilizó el programa Visual Modflow (Modflow, MT3D) de Waterloo Hydrogeologic, a los efectos de programar instancias efectivas de atenuación del fenómeno.

1. Seguimiento:

La perforación fue equipada con una electrobomba sumergible capaz de bombear 45 m³/h a 50 m de altura. Iniciado el funcionamiento continuo a principios del 10/98, el caudal de bombeo permaneció estable en 1050 m³/día (con valores instantáneos extremos de 40 y 47 m³/h respectivamente). Los niveles dinámicos permanecieron estables en alrededor de 25,5 mbnt, experimentando un leve ascenso la capacidad específica del pozo por efectos de desarrollo.

La conductividad del agua evolucionó rápidamente, estabilizándose a los 140 días en valores de 3250 µS/cm (Gráf. N°5- Pag. 8 - Valores de conductividad iniciales PB y Tendencia conductividad inicial PB sin bombeo F. Paraná).

2. Modelización inicial:

Se realizó una primera carga de datos y corrida inicial del modelo, calibrándola aproximadamente con los resultados observados en la evolución comentada anteriormente. El área modelizada correspondió a un cuadrado de 200 m de lado y 80 m de profundidad. Los parámetros hidráulicos del acuífero ingresados correspondieron a los medidos en ensayos de bombeo anteriormente realizados en la zona. Las variables de ajuste correspondieron a los valores de permeabilidad vertical, sólidos disueltos totales en las aguas alojadas en las arenas de la F.

Paraná y espesor total de estas arenas. Esta primera corrida sirvió para ajustar las posibles medidas de atenuación del proceso de salinización:

- se descartó la alternativa de **reducir los caudales de bombeo**, ya que la elevada conductividad hidráulica vertical del medio la hacía efectiva sólo para caudales inferiores a aproximadamente 80 m³/día (Q crítico), lo que nuestras observaciones y cálculos (según Bear y Dagan, 1963) habían verificado en la zona, tornándose impracticable como medio de abastecimiento centralizado de la ciudad. Una variante de este tipo, la utilización de una batería de pozos puntuales (Custodio y Llamas, 1976), tampoco cubría los requerimientos de operatividad del sistema ni la profundidad del nivel piezométrico

- asimismo la opción de **detener el bombeo un tiempo X por día** no producía ningún efecto de atenuación, sino sólo la prolongación de la evolución salina un tiempo aproximadamente equivalente a la suma de los X hasta alcanzar los valores de conductividad final correspondientes a la nueva situación de equilibrio, regida fundamentalmente por el

caudal promedio de bombeo. En efecto, durante las horas de "descansos X" la corrida en régimen transitorio sólo verifica recuperación de condiciones hidráulicas, sin ocurrir lo mismo con los transportes de masas, donde otros procesos (difusión, dispersión, etc.) amortiguan enormemente esta recuperación

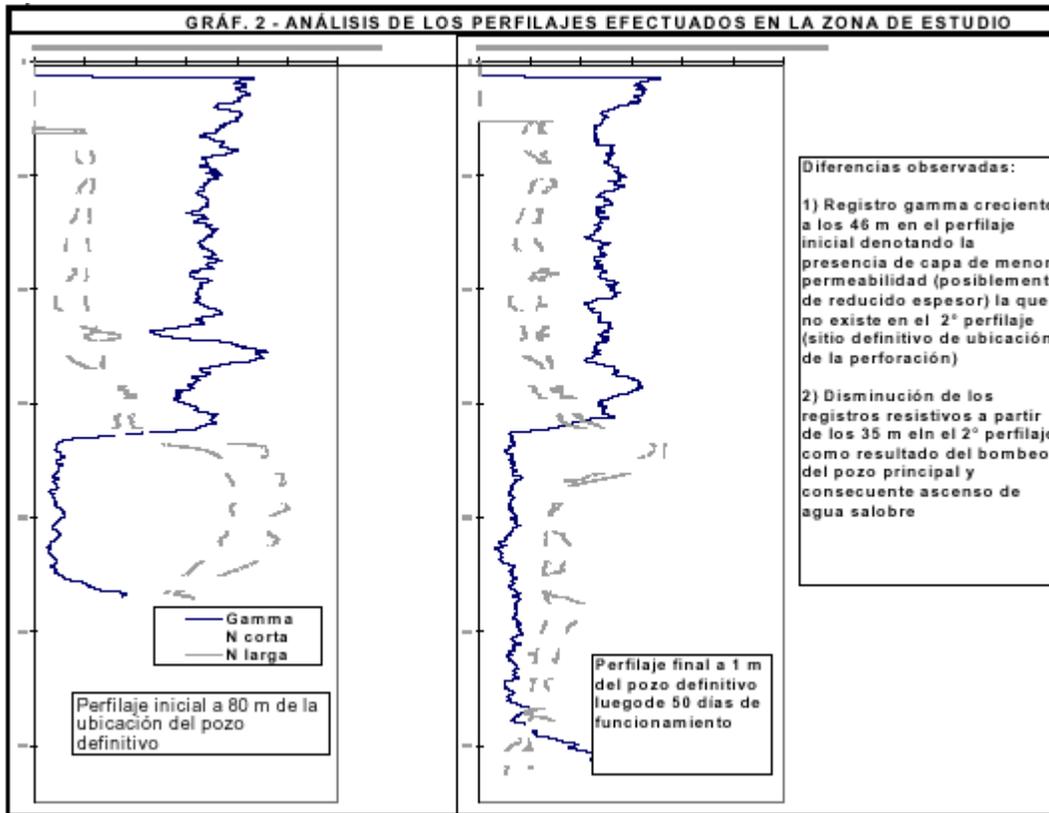
- finalmente se verificó que la alternativa más apropiada correspondía a la **descompresión por bombeo del agua salobre** (Babushkin, 1963) alojada en las arenas de la F. Paraná, generando una barrera hidráulica negativa de fondo, lo que limita y, es más, revierte rápidamente el fenómeno de ascenso local, aún después de iniciado el mismo. Según los resultados de la simulación, un caudal de 500 m³/día ya producía efectos considerables para nuestros propósitos (la salinidad descendía a alrededor de 1000 mg/l estables -equivalente a 1500 µS/cm- en el pozo principal)

PERFORACIÓN COMPLEMENTARIA DE BOMBEO EN LA F. PARANÁ

El pozo complementario para el bombeo de la F. Paraná (PD) se realizó a fines del 11/98 a 1 m de distancia del pozo de bombeo principal. Como paso previo se ejecutó en el mismo sitio un sondeo mecánico de pequeño diámetro para reconstrucción completa de la columna litológica hasta alcanzar francamente las "arcillas verdes" de la F. Paraná (sustrato acuicludo de la región), con perfilaje múltiple resistivo-gamma natural (gráf. 2- Perfilaje final)

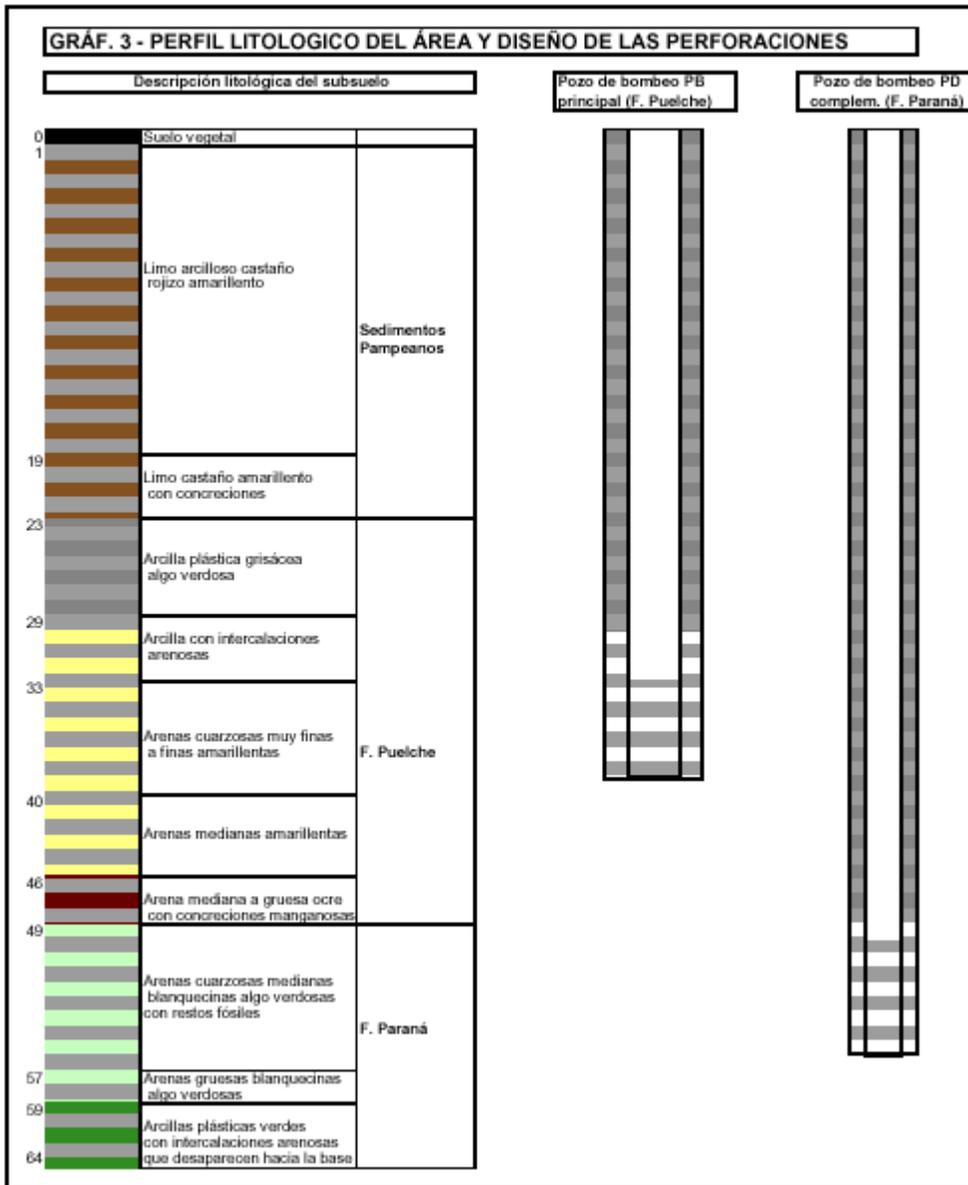
Este diagnóstico permitió observar características que luego servirían para modificar los "inputs" del modelo inicial debido a las condiciones del sitio en profundidad, que variaban en relación a las verificadas en el lugar del perfilaje inicial (distante sólo 80 m):

- en los registros gamma natural las "arcillas verdes" aparecen recién francamente a los 60 m de profundidad
- aparecen capas de baja permeabilidad relativa a los 45-47 m, sin ser francamente arcillosas, las que en otros sitios de San Lorenzo son capaces de atenuar los procesos intrusivos
- se observan concreciones manganosas a los 46-49 m de profundidad, probables fuentes del Mn²⁺ que se encuentra en algunas de las antiguas perforaciones de explotación ya intruídas
- además, la elevación del agua salina de fondo provocada por el bombeo del pozo principal (50 días de funcionamiento) es verificable en los registros resistivos, cuyos valores más altos se dan sólo en los 3 m superiores de las arenas de la F. Puelche, a diferencia de los encontrados en el primer sondeo



La perforación PD fue realizada en un diámetro de 250 mm, con entubamientos de 110 mm y filtros de PVC ranurado entre 48 y 54 m de profundidad. El espacio anular fue engravado hasta los 46 m de profundidad y luego aislado por cementación por inyección. El aforo de bombeo inicial de 4 hs. de duración (con el PB detenido 24 hs antes) dio los siguientes resultados:

CUANTITATIVO		CUALITATIVO	
Nivel estático:	18,05 m	Conductividad:	10900 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Nivel dinámico:	22,97 m		
Descenso:	4,92 m		
Caudal:	12 m ³ /h		
Capacidad específica:	2,44 m ² /h		



La diferencia entre el nivel estático del PD del PB (17,045 m y 18,05 m respectivamente: 1 m de disparidad) marca que en la zona y en esa época el potencial hidráulico del acuífero Puelche es superior al de las arenas de la F. Paraná, prevaleciendo los flujos descendentes de recarga en condiciones naturales.

MODELIZACIÓN FINAL

Finalmente se modificó el modelo inicialmente desarrollado con el ingreso de los nuevos datos obtenidos. A continuación se detallan la geometría y datos ingresados:

Datos generales

Area modelada: 40000 m ² (200x200)	Profundidad: 60 m
Grilla: 5488 celdas (28 filas X 28 col. X 7 layers)	Grad. Hidráulico reg. : 2:1000
Corrida Modflow: Transient WHS Solver 3 etapas	Recarga efectiva: 40 mm/año
Corrida MT3D: Advección MOC	

Capas:

	espesor (m)	Ky = Kx (m/d)	Kz (m/d)	P. efectiva	SDT (ppm)
Limos Pampeanos	26	5	1	0.1	700 (variable)
Acuitardo 1	6	1	0.2	0.05	
Arenas Puelches	14	22	7	0.25	700 (variable)
Acuitardo 2	2	8	2	0.15	
Arenas Paraná	12	22	7	0.25	6000 (variable)

Los resultados de la simulación pueden ser advertidos en las gráficas siguientes (Graf. 4 - Resultados de la modelización y calibración):

- en la corrida con 150 días de funcionamiento del PB (corte 1 y vista en planta layer de filtros) se observa la formación del domo salino local, ya en equilibrio, que alcanza la zona de ingreso de agua en el pozo

- en la corrida con 250 días de funcionamiento del PB y 100 días de funcionamiento del PD (corte 2) se advierte la reversión del fenómeno por influencia del bombeo del 2° pozo

- finalmente, la curva de calibración (concentración SDT vs. Tiempo) observado en un punto a 36 m de profundidad sobre la ubicación del PB, muestra lo siguiente:

.0 - 150 días (PB a 1100 m³/d): aumento de salinidad desde 700 a estabilidad en 2250 mg/l

.150 - 300 días (PB a 1100 m³/d; PD a 480 m³/d): disminución de salinidad hasta 1000 mg/l

.300 - 350 días (parada del PD): nuevo aumento de la salinidad

Sobre la misma curva se volcaron los puntos medidos en el ensayo posterior (marcas "+"), resultado que se comentará posteriormente.

REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE BARRERA POR BOMBEO DE LA F. PARANÁ

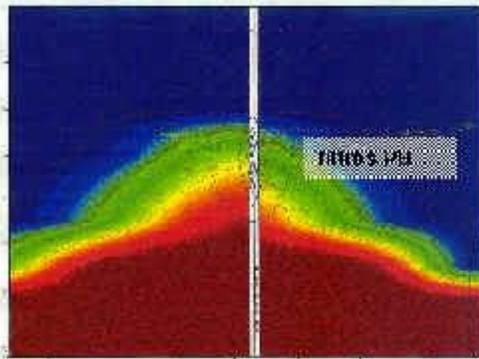
El nivel estático medido en el PD con el PB en régimen fué de 19,92 m, casi dos metros menos que el medido inicialmente con el PB detenido, lo que demuestra la influencia de su bombeo en profundidad.

Estabilizados los valores de conductividad en 3250 µS/cm a partir de los 140 días de comenzado el bombeo del PB, se inició el ensayo a los 150 días con el arranque del PD. Se reguló un caudal de bombeo de 480 m³/día (20 m³/h), según los valores modelizados. El agua extraída fue derivada mediante cañería hacia desagües pluviales de la zona, con destino final al Ao. San Lorenzo en cercanías de su desembocadura en el Río Paraná.

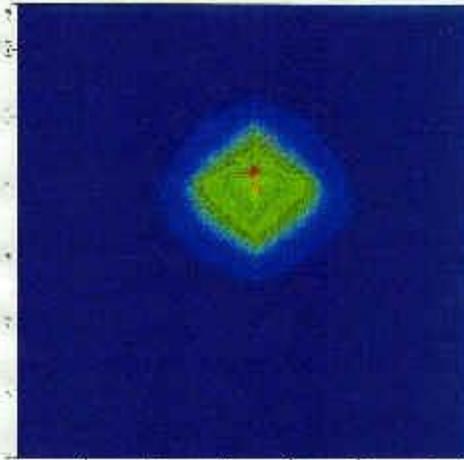
El decrecimiento de la conductividad del agua extraída por el PB fue sumamente rápido (mucho más que lo previsto por el modelo) alcanzando valores estables del orden de 1520

$\mu\text{S}/\text{cm}$ (aproximadamente equivalente a 1050 mg/l de sólidos disueltos totales) a menos de 10 días de iniciado el bombeo del PD. La conductividad del agua extraída por el PD también sufrió una disminución desde 10900 hasta valores del orden de los 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Gráf. 5 - Conductividad PB con bombeo F. Paraná)

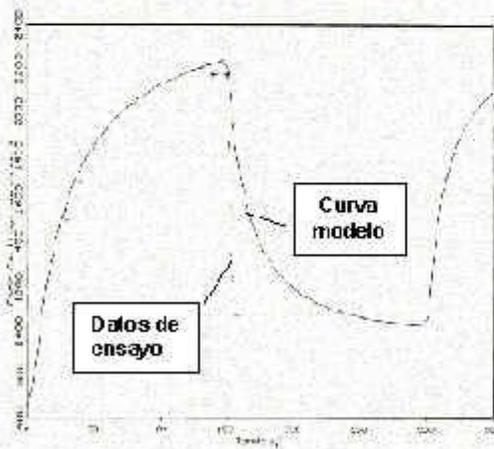
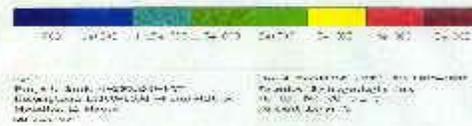
GRAF. 4 - RESULTADOS DE LA MODELIZACIÓN Y CALIBRACIÓN



Corte 1: corrida del modelo con 150 días de func. del PB (1100 m³/d): formación de domo caído de fondo localizado en cercanías del pozo de bombeo



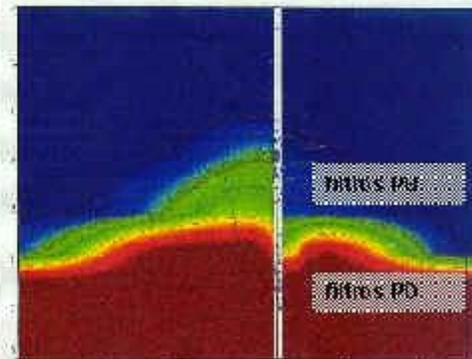
Vista en planta zona de filtros



Evolución de SDT del PB según modelo:

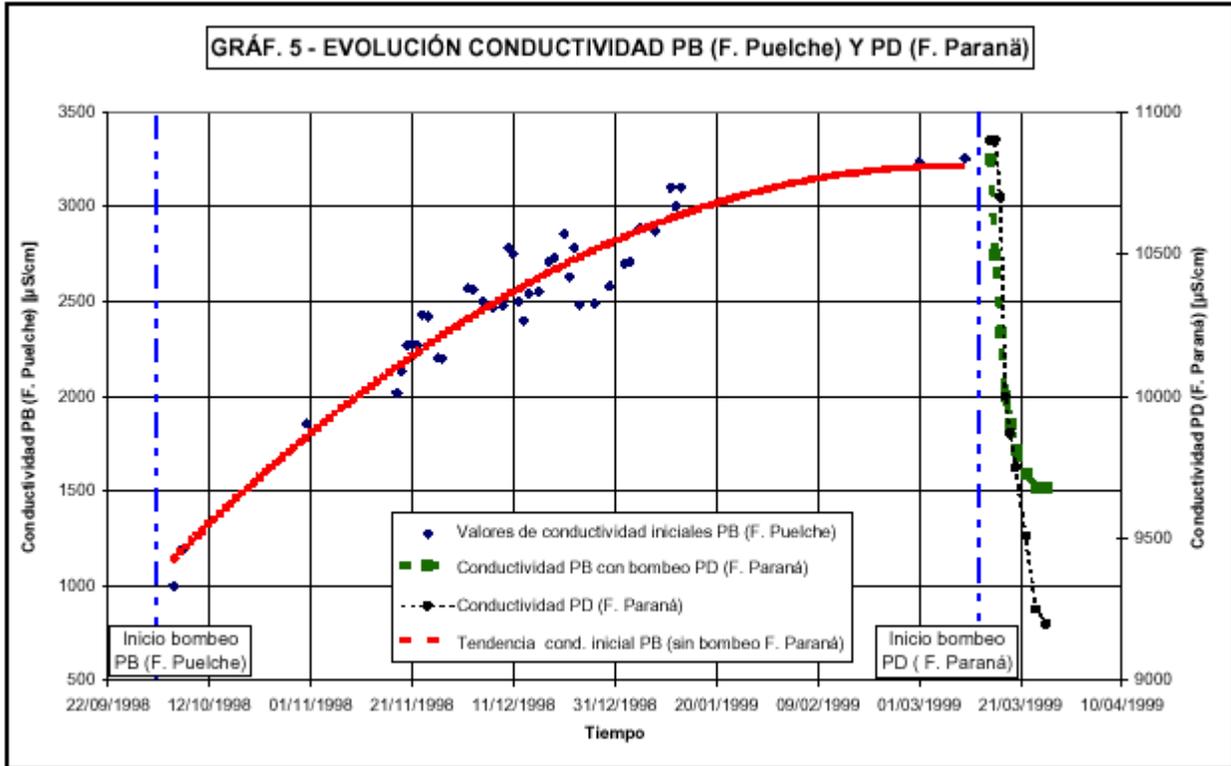
- 0-150 días: bombeo del PB (1100 m³/d)
- 150-300 días: más bombeo del PD (480 m³/d)
- 300-350 días: parada del PD

(+) Datos medidos durante el ensayo



Corte 2: corrida del modelo con 250 días de func. del PB (1100 m³/d) y 100 días del PD (480 m³/d): reversión del efecto local por barrera hídrica





El nivel dinámico del PB se redujo de 0,20 a 1 m con relación al medido inicialmente. Estas variaciones probablemente respondan en gran medida a cambios en el caudal instantáneo de bombeo (el pozo está conectado a red de consumo con variaciones de presión y por ende de erogación de bombeo; la producción fue seguida sobre los registros de un medidor de integración); cualitativamente sin embargo el resultado ha sido una leve disminución de niveles indudablemente influida por el bombeo del PD.

DISCUSIÓN - CONCLUSIONES

La salinización progresiva de perforaciones por intrusión de fondo es un problema de antigua data en amplios sectores de la llanura pampeana (Gollán y Lachaga, 1939). Condiciones geológicas como la presencia de depósitos fluviales o climáticas recientes que favorecen la recarga de acuíferos alojados en materiales eólicos, generan las condiciones para la existencia de reservas de agua dulce, muchas veces apoyadas sobre sustratos acuíferos con aguas saladas congénitas o por procesos secundarios, sin aislación hidráulica entre sí.

La cuestión entonces reside en compatibilizar el diseño y modo de extracción con las características hidrogeológicas del medio.

En ambientes como los sedimentos Pampeanos, las reducidas permeabilidades verticales frecuentemente permiten prevenir el problema a través de la limitación de profundidades de perforaciones y caudales de extracción.

Cuando se trata de medios más permeables como los considerados en este trabajo, la alternativa de corregir la extracción generando una barrera por bombeo de agua salobre de fondo puede ser una alternativa válida, dada la localidad del fenómeno intrusivo. La dimensión de este bombeo depende de las relaciones entre permeabilidades horizontales y verticales de las matrices, de las

calidades de agua y espesores acuíferos, de los objetivos a alcanzar por el operador, etc. Quedan sin embargo algunos temas a evaluar:

.la continuidad de la extracción de agua menos mineralizada debido a la corrección local por efecto de barrera estará sujeta a las reservas hidrogeológicas existentes en la "capa de agua dulce" y a la recarga efectiva en el área influenciada por la captación. Una explotación abusiva (Custodio, 1997), en este caso, implicará un progresivo adelgazamiento de esta capa y un paulatino y lento deterioro en la calidad del agua extraída

.la operatoria cotidiana de la captación requiere de un diagnóstico inicial preciso y de un monitoreo permanente. Por ejemplo, en el pozo de barrera, ubicaciones menos favorables de filtros o excesos de bombeo pueden conllevar pérdidas por extracción de parte de la capa de agua dulce (Custodio y Llamas, op cit)

.la evacuación del agua salobre captada por el pozo de barrera impone del análisis de impacto correspondiente para su disposición, problema compartido con tratamientos para desmineralización de aguas (ej. eliminación del rechazo de ósmosis inversa). En el caso de San Lorenzo, pensamos que la capacidad de dilución del Río Paraná posibilita su uso como destino final de estos caudales y calidades de aguas, lo que será motivo de nuevos estudios.

Otra alternativa puede residir en su inyección en acuíferos más profundos .la utilización de herramientas de modelización de acuíferos representa sin duda una enorme colaboración para comprender estos procesos y predecir cualitativamente su devenir futuro, aún a largo plazo. Sin embargo son necesarias muchas observaciones e investigaciones de diagnóstico para que los resultados cuantitativos se correspondan de manera precisa con la realidad, como lo hemos comprobado en este trabajo, quizá por errores cometidos por desprecio de fenómenos dispersivos (C. Zheng, 1990)

BIBLIOGRAFÍA:

Custodio E., Llamas M. R., 1976. Hidrología Subterránea. Ed. Omega. Pp. 1371-1375

Bear J., Dagan G., 1963. Intercepting fresh water above the interface in a coastal aquifer. IASH

Babushkin V. D., 1963. Methods of exploiting and evaluating the resources of fresh water lenses.

The development of groundwater resources with special reference to deltaic areas. UNESCO.

Water resources series, n° 24, pp. 188-192.

Gollán J., Lachaga D., 1939. Aguas de la Provincia de Santa Fe. IEIYFAG, Publ. Técn. N° 12

Custodio E., 1997. Explotación racional de las aguas subterráneas. Actas I Congreso Nacional de Hidrogeología, pp. 20-24.

C. Zheng, 1990. MT3D - A modular three dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Pp. 4-6_4-31.