

EVALUACION DE AGUA SUBTERRANEA PARA RIEGO EN LA ESTANCIA SAN BERNARDO, DEPARTAMENTO CAPITAL, PROVINCIA DE SAN LUIS, ARGENTINA

**Luis O. Bonini¹; Norberto G. Bucich²; Adolfo E. Fernández³ &
Juan J. Herrero Ducloux¹**

Resumen - Se describen las tareas realizadas para alumbrar aguas subterráneas con fines de riego en una zona con información hidrogeológica muy escasa. Los estudios se llevaron a cabo en un predio propiedad de la empresa SER ARGENTINA S.A. de aproximadamente 20.000 Ha, ubicado a 30 Km al sudoeste de la ciudad de San Luis, República Argentina.

Los aportes pluviales de la falda occidental de las Sierras de San Luis, con valores que oscilan entre 400mm y 450mm anuales constituyen, juntamente con el río El Chorrillo, la principal fuente de recarga de la cuenca, con niveles del agua subterránea entre 100m y 14m.

Hasta la fecha se realizaron 154 sondeos eléctricos verticales (SEV), 7 perforaciones de exploración y 28 perforaciones de explotación, con ensayos por bombeo en cada una de éstas últimas. Las pruebas de riego realizadas para verificar el funcionamiento del equipamiento y la calidad del agua dieron resultados satisfactorios.

El trabajo presenta resultados, pautas y procedimientos utilizados en cada etapa del estudio. También muestra las características y resultados de un modelo analítico, para verificar el modelo conceptual adoptado y la interferencia entre los pozos; así como mapas de resistencia eléctrica transversal de la capa de interés, transmisividad hidráulica y caudales específicos de los pozos.

Keywords – Agua Subterránea, Evaluación, Riego

1. INTRODUCCION

Se exponen los resultados de un estudio hidrogeológico efectuado en la estancia San Bernardo, propiedad de la empresa SER ARGENTINA S.A.

¹ GEOPROSPEC S.R.L., Belgrano 835, of.1, (1092) Buenos Aires, ARGENTINA, Tel/Fax: +54-11-4334-2363/2366, email: info@geoprospec.com.ar

² Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), sede San Juan, Av. Ignacio de la Rosa 125 Este, (5400) San Juan, ARGENTINA – Tel.: +54-264-421-4826 – Fax: +54-264-421-2415, email: ngbucich@movi.com.ar

El objetivo del mismo consistió en alumbrar aguas subterráneas con fines de riego en una zona de la provincia de San Luis hidrogeológicamente muy poco conocida.

Se siguió un orden metodológico consistente en reconocimiento de campo, inventario hidrogeológico, prospección geofísica, perforaciones de exploración, perforaciones de explotación, ensayos de bombeo y modelo matemático de diagnóstico.

Hasta la fecha se realizaron 28 perforaciones que brindan caudales que varían entre 120 y 200 m³/h cada una.

2. UBICACION GEOGRAFICA

La estancia San Bernardo posee una superficie de 23.000 ha. Está ubicada en la provincia de San Luis, a 30 km al sudoeste de la ciudad homónima, dentro del departamento Capital.

Se accede a la misma por la ruta provincial N° 146, que hacia el sur lleva a la localidad de San Rafael.

El establecimiento está limitado al sudoeste por las salinas del Arroyo Bebedero, al norte por la ruta nacional N° 7, y al este y sur por la ruta provincial N° 146 figura 1.

³ Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), Autopista Ezeiza-Cañuelas, tramo Jorge Newbery, Km 1,62, (1802) Buenos Aires, ARGENTINA, – Tel/Fax: +54-11-4480-0862, email: afernandez@ina.gov.ar

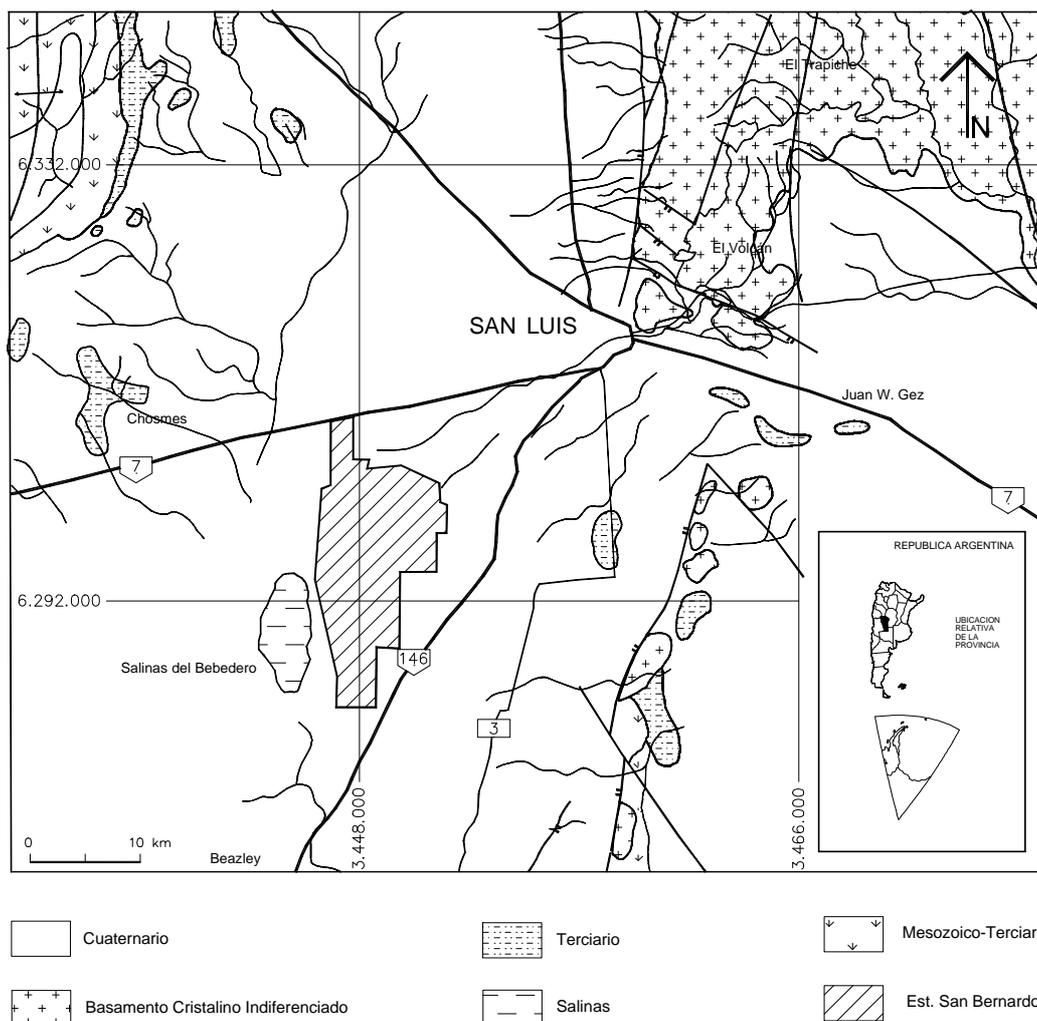


Figura 1. Mapa Geológico y ubicación del establecimiento.

3. CUADRO GEOLOGICO REGIONAL

El campo está ubicado entre dos elementos tectónicos principales: al este, el macizo montañoso de la sierra de San Luis y el alto topográfico representado por su prolongación austral en el subsuelo y los afloramientos de los cerros Lince, Grande y Chico, serras de Chartone, de Varela y cerrillo de las Salinas; y al oeste, la exondación de la cuenca de Beazley, la cual consiste en un depósito sedimentario de origen tectónico con un relleno del orden de los 4000 m (Criado, Roque et al., 1981). La salina del Bebedero indica la máxima exondación de esta cuenca, tanto en profundidad como topográficamente. Al noroeste, del lado occidental de la Cuenca de Beazley, afloran rocas precámbricas, triásicas, cretácicas y terciarias, que constituyen las sierras del Alto Pencoso, del Gigante y de las Quijadas (Criado, Roque et al., 1981).

La sierra de San Luis es un bloque tectónico elevado cuya litología predominante consiste en rocas metamórficas y plutónicas de edades precámbricas y paleozoicas. Hacia el sur, en las sierras de

Charlone y Varela, afloran además de rocas precámbricas, sedimentos triásicos, cretácicos y terciarios.

Adosados a la sierra de San Luis, por el oeste de la misma, yacen potentes conos de deyección que se continúan en una suave pendiente pedemontana hacia la cuenca de Beazley.

En la anterior, en superficie, sólo se observan sedimentos (arenas, limos y arcillas) de edad cuartaria (Pleistoceno-Holoceno), las cuales recubren el depósito formado por los abanicos aluviales que bajan de la sierra de San Luis hacia la laguna El Bebedero, compuestos éstos por rodados, arenas, limos y arcillas intercalados entre sí, cuya litología refleja los episodios tectónicos relacionados con la elevación de las sierras y la profundización de la cuenca tectónica de Beazley. Por debajo de los aluviones de edad terciaria y cuartaria, podrían existir rocas cenozoicas y mesozoicas, similares a las que afloran en las sierras del Alto Pencoso y del Gigante (al oeste) y en las sierras de Charlone y Varela (al este y sudeste).

4. SITUACION HIDROGEOLOGICA REGIONAL

La provincia de San Luis constituye una franja intermedia entre la región semidesértica del oeste argentino y la zona pampeana propiamente dicha.

La precipitación pluvial es máxima en su límite con Córdoba, a la altura de la sierra de los Comechingones, donde alcanza los 700 mm anuales. Este valor decrece marcadamente hacia el oeste, con registros mínimos en el extremo noroccidental. Las lluvias no pasan los 200 mm anuales en el límite con las provincias de La Rioja y San Juan.

En la zona de estudio las precipitaciones alcanzan 450 mm al este, mientras que el límite occidental tiene una precipitación anual de 400 mm

La estancia San Bernardo se ubica en el extremo sudoeste de un abanico aluvial con vértice en la desembocadura en la llanura pedemontana del río El Chorrillo, al sur de la ciudad de San Luis. Los aportes pluviales de la falda occidental de las Sierras de San Luis constituyen, juntamente con El Chorrillo, la principal fuente de recarga de la cuenca. Salvo en avenidas muy extraordinarias, a San Bernardo no llegan flujos superficiales.

Dentro de la estancia San Bernardo, las profundidades del agua subterránea disminuyen hacia las salinas del Bebedero desde 100 m en el extremo oriental del campo a 14 m en el extremo occidental.

La zona deprimida que conforman las salinas del arroyo Bebedero, constituye la descarga subterránea de la cuenca y es lugar de gran concentración salina por los efectos de la evaporación que aquí tiene lugar.

5. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Antes de comenzar la extracción, el sistema acuífero se encontraba en un estado de equilibrio dinámico en el que recarga y descarga estaban compensadas. La descarga provocada artificialmente por el bombeo de los pozos altera artificialmente este balance, introduciendo un nuevo componente (pérdida

de almacenamiento). El equilibrio no se restablecerá hasta que no se compensen las pérdidas de agua almacenada. Esto sólo puede suceder como consecuencia de:

- Incremento de la recarga (natural o artificial).
- Disminución de la descarga natural.
- Una combinación de las dos condiciones anteriores.

La expresión analítica, en forma de ecuación de dimensiones Longitud / Tiempo, es la siguiente:

$$R + \Delta R = D + \Delta D + q + S^*(\Delta h / \Delta t)$$

donde

R = caudal de recarga por unidad de superficie

ΔR = cambio inducido en el caudal de recarga por unidad de superficie

D = caudal de descarga por unidad de superficie

ΔD = cambio inducido en el caudal de descarga natural por unidad de superficie

q = caudal de bombeo por unidad de superficie

$S^*(\Delta h / \Delta t)$ = caudal del cambio en el almacenamiento por unidad de superficie

La ecuación analizada anteriormente evidencia la importancia de contar con un modelo conceptual (recarga, descarga, flujo y almacenamiento) del embalse subterráneo cuando se quiere hacer un aprovechamiento sustentable del mismo.

El embalse subterráneo que nos ocupa responde al modelo de sistema acuífero multicapa en una cuenca cerrada con déficit hídrico permanente rodeada de montañas donde se produce la recarga. Los sedimentos que constituyen el reservorio son gruesos y permeables cerca del cordón montañoso y de grano fino y mucho menos permeables en la playa central, que funciona como nivel de base, o en sus proximidades.

En la salina la superficie freática coincide con la superficie topográfica o es somera pero se profundiza notoriamente en función de su proximidad con la zona de recarga en la montaña.

La descarga natural capturada por captaciones próximas al nivel de base, como el caso de la perforación PSB2, puede ser la única procedencia del agua hacia los pozos de bombeo. La captura se produce por descenso de la superficie freática, fuera del alcance de la evaporación y transpiración de las freatofitas, y por disminución del gradiente que provoca el flujo subterráneo hacia la playa. Pero esta condición es muy delicada ya que, de invertirse la dirección del flujo subterráneo como consecuencia del descenso de la superficie freática por debajo del nivel de base, podría producirse un indeseado aporte de aguas saladas desde la playa hacia las captaciones.

6. TRABAJOS EFECTUADOS

6.1. SITUACIÓN ORIGINAL DEL CAMPO - TAREAS PRELIMINARES

Antes de iniciar los estudios hidrogeológicos, en la estancia San Bernardo sólo existían algunos

caminos irregularmente distribuidos dentro de un monte xerófito arbóreo y arbustivo muy tupido; además de ocho pozos construidos con la finalidad de explotar agua para uso ganadero. De estos pozos, cuatro de ellos cavados a pico y pala, sólo llegaban hasta el nivel freático; los restantes lo fueron por el método de percusión, alcanzando el más profundo los 130 m. Estos pozos al igual que otros seis pertenecientes a establecimientos vecinos se incluyeron en el inventario hidrogeológico previo, que consistió en medición de niveles, conductividad eléctrica y temperatura.

Los trabajos sistemáticos se iniciaron con la apertura, en el monte, de 80 Km de picadas transitables por vehículo, de rumbo norte-sur. Luego se efectuó el relevamiento topográfico de las mismas, utilizando un GPS de precisión.

6.2. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Seguidamente se efectuó una prospección geofísica mediante el método de resistividad empleando el sistema Schlumberger. Se midieron 154 sondeos eléctricos verticales (SEV) a lo largo de las picadas recién abiertas y caminos preexistentes; sus ubicaciones se exponen en la figura 2. El distanciamiento entre mediciones sucesivas fue de 1 km, con lo cual se relevaron aproximadamente 160 km entre picadas y caminos preexistentes.

Los SEV fueron interpretados mediante un método automático, determinándose la existencia de cuatro capas geoelectricas, las que de arriba hacia abajo son: Superficial 2-250 ohm x m; Conductiva Superior 1-85 ohm x m; Resistiva o de Interés 10-50 ohm x m; Conductiva ó Inferior < 10 ohm x m. Con los resultados de la interpretación, se elaboraron ocho cortes geoelectricos de los cuales solo se muestra en la figura 3 el corte correspondiente a la sección A-A', que cruza al campo de NE a SO, es decir en la dirección en la que se producen los mayores cambios litológicos. En el mismo se observan las cuatro unidades. La Capa Geoelectrica Superficial carece de interés hidrogeológico por encontrarse arriba del nivel freático. Los espesores registrados varían desde 3-4 m hasta 30 m.

La Capa Geoelectrica Superior posee valores de resistividad con menor fluctuación que los observados en la capa anterior. Los valores más altos corresponden a las áreas topográficamente más elevadas y por consiguiente secas; mientras que los valores de menor resistividad pertenecen a las zonas topográficamente bajas y en general saturadas con las aguas subterráneas próximas a la zona de descarga de la salina del Bebedero. Esta capa adquiere espesores cuya magnitud varía entre 10 y 40 m. Aquí también los valores más altos de resistividad concuerdan con la zona oriental del establecimiento, en correspondencia con materiales más gruesos en el subsuelo por su mayor proximidad a las zonas de aporte. Las perforaciones demostraron que está compuesta por intercalaciones de arenas, gravillas y gravas; existiendo muchas lentes limosas, limo-arcillosas y arcillosas.

La Capa Resistiva es la única que posee interés hidrogeológico y como veremos aporta importantes caudales de agua con conductividades que fluctúan entre 800 y 1200 $\mu\text{mohs/cm}$. La litología es similar a la de la capa anterior.

Por debajo se encuentra la Capa Conductiva ó inferior, cuyo techo oscila entre 150 y 200 m de profundidad. Las perforaciones sólo alcanzaron el techo de la misma, siendo su composición arcillosa.

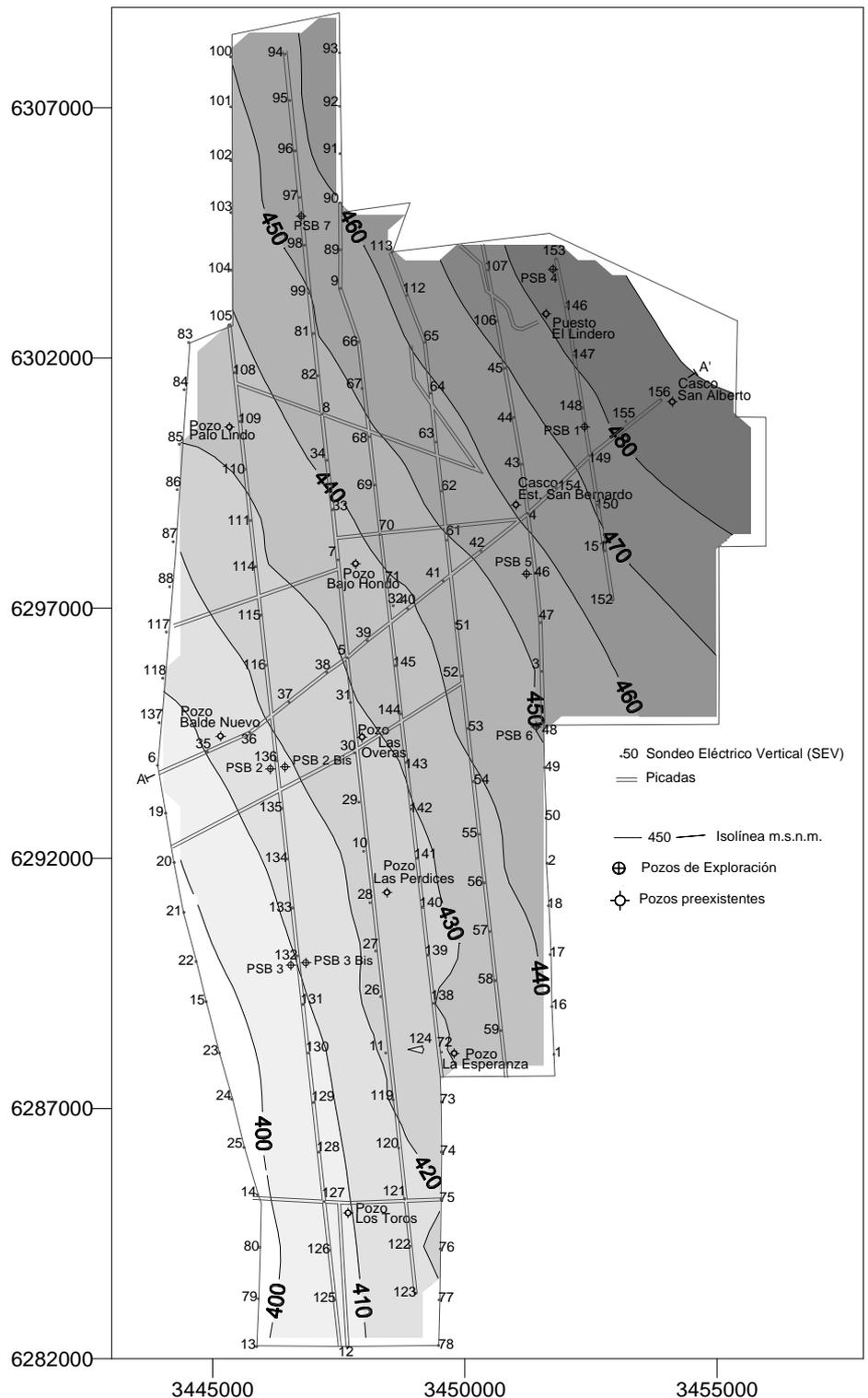


Figura 2. Ubicación de sondeos eléctricos verticales SEV

Se supone que esta capa, cuyo piso no se conoce, posiblemente incluya intercalaciones arenosas con aguas salobres.

Seguidamente se realizó un mapa de la Resistencia Transversal de la Capa de Interés de la estancia, utilizando para ello todos los SEV (figura 4).

La Resistencia Transversal (T), es un parámetro geoelectrico que está conformado por el producto de la resistividad (ρ) de una capa por el espesor de la misma (E) (Maillet, 1947):

$$T(\text{Ohm} \times \text{m}^2) = \rho (\text{ohm} \times \text{m}) \times E (\text{m})$$

Se trata de un parámetro de gran importancia hidrogeológica, debido a que cuanto mayor sea su valor, mejor será su comportamiento acuífero, puesto que los valores de ρ y E también serán elevados.

Al valor de la Resistencia Transversal (T) se lo relaciona directamente con el parámetro hidrogeológico Transmisividad (también representado con T) (Duprat et al., 1970): $T = K \times E$

Existen casos en la literatura específica (Henriet, 1976) que demuestran que cuanto mayor es el valor de la Resistencia Transversal de un acuífero, mayor es su Transmisividad.

Del análisis del mapa (figura 4) surge que en el área prospectada existen sectores con distintos valores de Resistencia Transversal agrupados en tres categorías:

- > 2000 ohm x m² **Area de Interés Hidrogeológico Primario**
- 1000-2000 ohm x m² **Area de Interés Hidrogeológico Secundario**
- < 1000 ohm x m² **Area sin Interés Hidrogeológico**

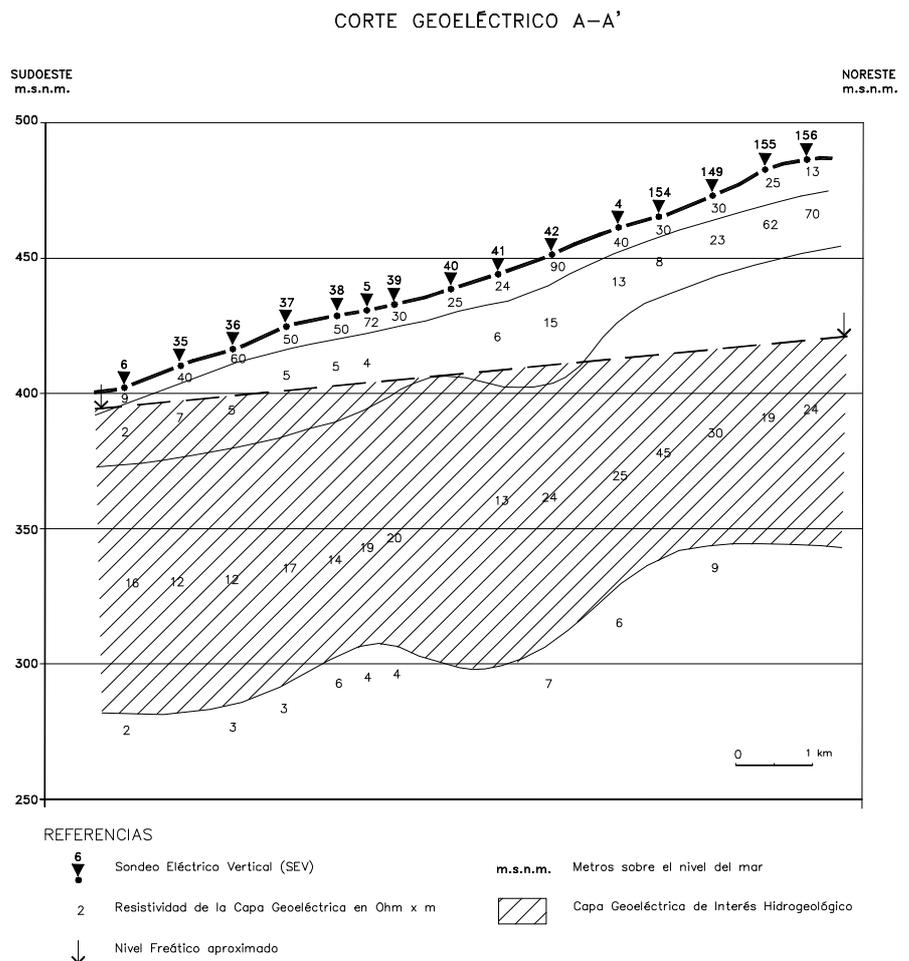


Figura 3. Corte Geoelectrico A-A'

6.3. PERFORACIONES DE EXPLORACIÓN

Con el objeto de reconocer las tres áreas anteriores se realizaron siete perforaciones de exploración o estudio.

Dentro del Area de Interés Hidrogeológico Primario, las perforaciones: P.S.B. N° 1 (Perforación de Exploración San Bernardo N° 1); P.S.B. N° 4; P.S.B. N° 5 y P.S.B. N° 6.

Dentro del Area de Interés Hidrogeológico Secundario: P.S.B. N° 2; P.S.B. N° 2 bis; P.S.B. N° 3 y P.S.B. N° 3 bis.

Dentro del Area sin Interés Hidrogeológico: P.S.B. N° 7.

Las perforaciones se efectuaron por el método rotativo. Las profundidades alcanzadas fluctuaron entre 120 y 150 m. Se tomaron muestras litológicas metro a metro, efectuándose control de avance y de fluido de inyección.

Se registraron perfilajes eléctricos de las mismas, realizándose mediciones de radiación gamma natural, potencial espontáneo y resistividad lateral (lateroperfil-3).

Las perforaciones fueron entubadas, instalándose filtros frente a las capas gravosas y arenosas que se hallaron por debajo del nivel freático.

Se limpiaron las perforaciones mediante bombas electrosumergibles y se tomaron muestras de aguas para análisis físico-químicos.

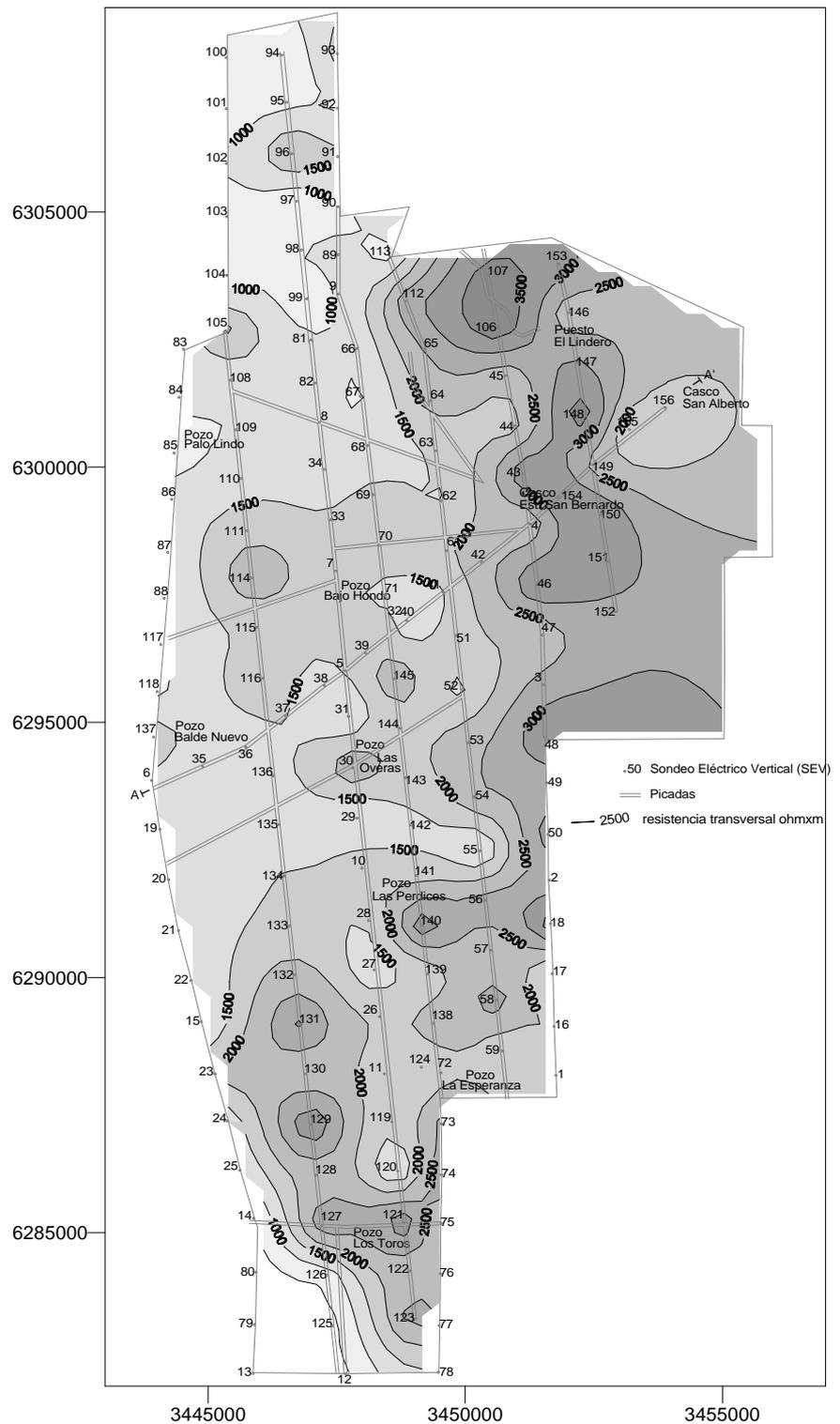


Figura 4. Resistencia transversal de la capa de interés

Las perforaciones P.S.B. Nº 2 bis y P.S.B. Nº 3 bis fueron instaladas a 7 m de distancia respectivamente de las perforaciones P.S.B. Nº 2 y P.S.B. Nº 3; se efectuaron para obtener muestras del agua subterránea contenida dentro de la Capa Geoeléctrica Superior.

Estas perforaciones determinaron la existencia de un acuífero con aguas salobres (1500-3000 $\mu\text{mohs/cm}$) entre los 14 y 45 m de profundidad alojado por encima del acuífero explotable presente dentro de la Capa de Interés y separado de la misma por una capa de 8-10 m de arcilla.

Este acuífero salobre sólo se extiende en el sector centro y sur de San Bernardo, abarcando unas 5.000 ha. No se constataron diferencias de presión entre ambos acuíferos.

En el caso de la perforación P.S.B. Nº 2, el contenido salino del acuífero inferior fue de 850 mg/l, en tanto que en la perforación P.S.B. Nº 2 bis, el contenido salino del acuífero superior fue de 2335 mg/l.

La presencia de esta capa con agua salobre, por encima del agua explotable para riego, obligó a tomar precauciones de aislación entre ambos acuíferos durante la construcción de las perforaciones de explotación.

Las perforaciones de exploración determinaron la profundidad del nivel freático; la profundidad de la Capa de Interés, el espesor de la Capa de Interés y la relación entre los espesores de arena y arcillas dentro de la Capa de Interés, la que fluctuaba entre 1,25 y 5,55, correspondiendo los mayores valores a las perforaciones orientales: P. S.B. Nº 1, Nº 4, Nº 5 y Nº 6.

Se construyeron mapas de todos estos parámetros, no expuestos aquí por razones de espacio.

Las perforaciones de exploración, como así también las posteriores de explotación, demostraron que las diferencias en la resistividad eléctrica entre las áreas de distinto interés hidrogeológico, delimitadas en el mapa de igual valor de la Resistencia Transversal, responden a diferencias en la relación capas arena – capas arcillas del sedimento que las compone (a mayor contenido de arcilla, menor resistividad eléctrica) y por consiguiente, menor Resistencia Transversal.

Los análisis químicos de las aguas revelaron una uniformidad en la calidad de aquellas pertenecientes a la Capa Resistiva de Interés. Se trata de aguas sulfatadas-cloruradas-carbonatadas, las que poseen en promedio 900 mg/l de sólidos disueltos.

Desde el punto de vista del su uso agrícola, estas aguas caen dentro de las categorías C3-S2 y C3-S3 de la clasificación Riverside (U.S. Salinity Laboratory Staff; cf. Tames, 1965).

6.4. PERFORACIONES DE EXPLOTACIÓN

Hasta la fecha se efectuaron 28 perforaciones de explotación agrupadas en la zona central de la estancia dentro del Area de Interés Hidrogeológico Primario determinado en el mapa de igual Resistencia Transversal. La primera de éstas sirvió para conocer los caudales que podían producir las perforaciones, realizándose en la misma, un ensayo de bombeo de larga duración, para lo cual se construyeron dos pozos piezométricos adicionales.

Debido a que los caudales a explotar fluctúan entre 120 y 200 m³/h, los agrónomos de SER ARGENTINA SA decidieron instalar equipos regadores de pivote central con un brazo de 900 m, los que requieren para su funcionamiento entre 550 y 600 m³/h, durante un periodo de riego de hasta 80 días. Debido a lo anterior, se resolvió la construcción de cuatro perforaciones por cada equipo regador. Hasta ahora han sido instalados tres equipos, estando otros cuatro en montaje. En la figura 5 se observa la ubicación de los actuales equipos de riego.

Los agrónomos cubrieron el plano de la estancia con círculos de 900 m de radio, numerándolos de sur a norte. Hasta el momento sólo se explotarán siete de éstos, correspondiendo a los números 25, 26, 32, 33, 34, 35 y 36.

Cada círculo lleva un número principal correspondiente al círculo de riego y cuatro subnúmeros (1-4) que corresponden a cada una de las perforaciones que alimentan el equipo, siendo siempre la número 1 la central. Así por ejemplo la perforación 36-2 se trata de la perforación N° 2 del círculo 36.

Las perforaciones se efectuaron por el método de rotación. Previamente, en cada una se realizó un pozo piloto que fue perfilado

eléctricamente, determinándose para cada uno, con la ayuda de la descripción litológica y los tiempos de perforación, la ubicación de la columna de filtros y caños ciegos.

Como se mencionó más arriba, debido a la naturaleza del depósito de pie de monte, los espesores de capas de arenas y materiales finos (limos y arcillas) -esto es, de materiales productivos y no productivos- son variables de un lugar a otros. Por lo tanto, los caudales explotables son diferentes en cada perforación. En general, pese a que el nivel freático está más próximo a la superficie, los caudales disminuyen hacia el oeste, debido al mayor porcentaje de material fino en el depósito sedimentario.

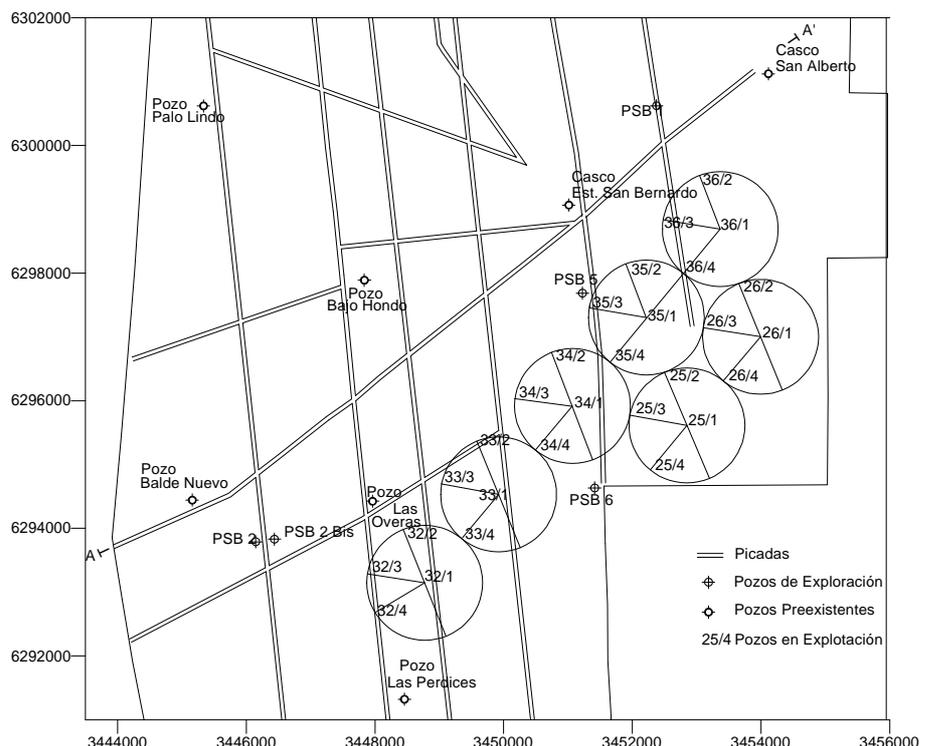


Figura 5. Ubicación de los actuales equipos de riego

6.5. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS

Con el fin de optimizar el diseño de las perforaciones futuras y cuantificar las características del equipo de bombeo a instalar en cada perforación, se realizaron ensayos de acuíferos y de pozos en cada una de las mismas. Estos ensayos permitieron determinar los parámetros hidrodinámicos del reservorio así como conocer las pérdidas de carga producidas en las inmediaciones de la obra, resultantes de las características intrínsecas de cada una de las captaciones.

Las pruebas hidráulicas se realizaron finalizada la etapa de limpieza y desarrollo en cada perforación.

Para la determinación de las pérdidas de carga no lineales en el pozo se llevaron a cabo ensayos a caudales escalonados. Se realizaron veinticuatro pruebas de este tipo. La extracción en cada escalón se realizó a caudal constante durante un mínimo de noventa minutos. Antes de comenzar cada nuevo escalón de bombeo se esperó hasta que el nivel del agua en el pozo difiriera en menos de 10 cm respecto del nivel estático medido antes de iniciar la prueba.

En la mayoría de los casos, este tipo de ensayo se realizó con cuatro escalones. En otros, razones operativas determinaron que la prueba se debiera llevar a cabo con sólo tres periodos de bombeo.

Para analizar los resultados de este tipo de verificaciones de campo se graficaron, a partir de los valores de caudal (Q) y depresión (s) obtenidos en cada prueba, las curvas características “caudal versus depresión” y “caudal específico versus depresión”.

Para acuíferos cautivos sin pérdidas de carga no lineales, las curvas características Q/s (caudal vs depresión) son una recta que nace en la intersección de los ejes ortogonales. Cuando las pérdidas de carga en el pozo y sus alrededores empiezan a evidenciarse, la curva comienza a inclinarse hacia el eje de la depresiones, siguiendo una función no lineal.

La mayoría de curvas de campo no se ajustan a las condiciones antedichas. Si bien algunas tienden al cero, no todas cumplen con esta condición ni se alinean en una recta. Tres tipos de pozos pudieron ser identificados a partir del análisis de las curvas caudal depresión:

Tipo a: La recta de regresión de cada ensayo tiende a cortar el eje de caudales en valores iguales o mayores que 10 m³/h. Generalmente las curvas de las mediciones de campo presentan una convexidad hacia el eje de los caudales que se suaviza a medida que los valores aumentan. Con trece casos, es el tipo más frecuente. La figura 6 muestra las curvas características correspondientes a esta categoría.

La condición de cortar al eje de caudales en valores notoriamente mayores que cero, que caracteriza a la mayoría de los pozos ensayados, estaría indicando un sistema acuífero multicapa con un estrato acuífero dominante de mayor nivel piezométrico. Estrato que aporta al resto más de 10 m³/h, mientras el pozo está en descanso. **Tipo b:** La recta de regresión tiende al valor cero de caudales. Está representada por siete casos. Aquí los diferentes horizontes productivos del acuífero multicapa tienen un

nivel piezométrico similar, están equilibrados. La figura 7 muestra los puntos correspondientes a los siete pozos de esta categoría.

Tipo c: La recta de regresión corta al eje de caudales en valores menores que cero. Representa el tipo menos frecuente. La figura 8 muestra los únicos dos casos en que el pozo “pierde agua” mientras está en reposo. Esta condición

es indicativa de que los filtros están captando una formación seca o con nivel piezométrico menor que el resto de las formaciones acuíferas alumbradas. En el presente caso se verificó, mediante el registro de electroperfilaje, que la capa resistiva superior había sido aislada por lo que debe adoptarse la segunda hipótesis.

La figura 9 muestra la nube de puntos correspondientes a las curvas características Q/s versus s. El rendimiento de los pozos varía entre 2 m³/h/m y 30 m³/h/m, con valores más frecuentes entre 5 m³/h/m y 25 m³/h/m. El valor anómalo Q/s > 40 m³/h/m, correspondiente al pozo 26/3, que no se evidencia en las curvas caudal versus depresión, debe adjudicarse a un error en la medición del caudal del primer escalón.

Para calcular la transmisividad, se prolongó el bombeo del escalón con mayor

caudal de los ensayos escalonados hasta una duración de, al menos, 180 minutos. Luego se midieron sistemáticamente los valores de la recuperación de niveles de agua en el pozo sometido a bombeo. Para el cálculo correspondiente se utilizó el método de Recuperación de Theis.

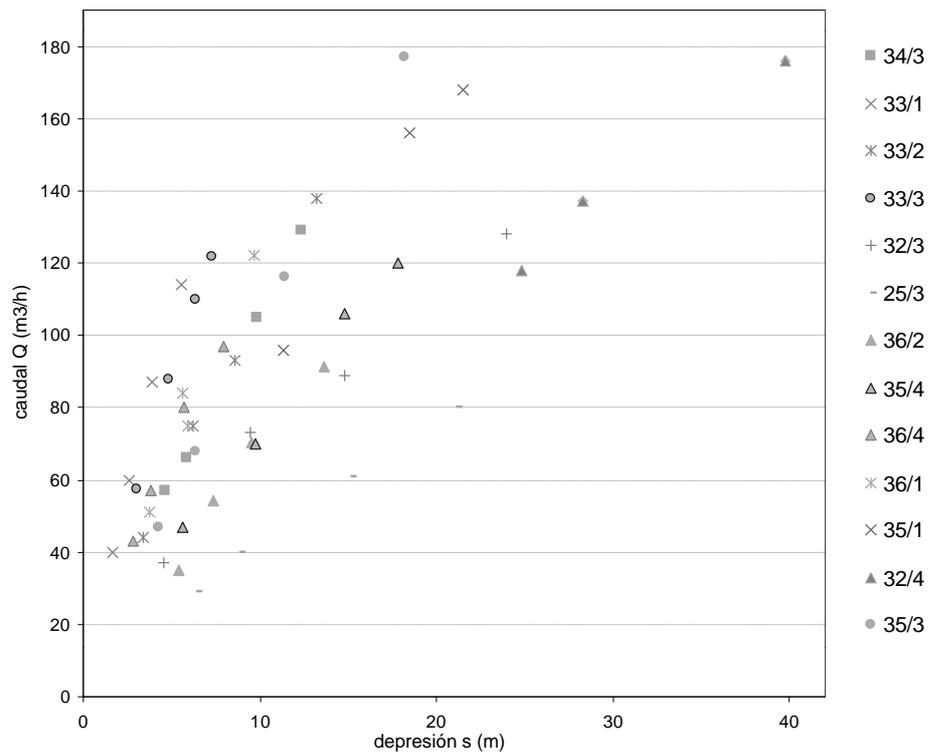


Figura 7: CURVAS CAUDAL/DEPRESIÓN TIPO 1

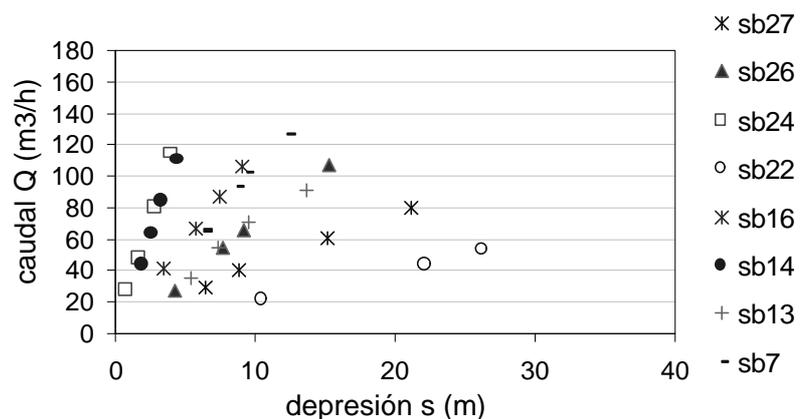


Figura 7: CURVAS Q/s - TIPO b

El mapa de la figura 5, construido a partir de los valores de Transmisividad kD resultantes de las pruebas de bombeo, muestra valores que van desde más de 1200 $m^2/día$ hasta valores menores que 400 $m^2/día$. Los mayores valores se registran en el rincón Noreste del mapa. También el círculo 33 correspondiente presenta valores mayores que 900 $m^2/día$.

La figura 10, muestra la distribución de los caudales específicos registrados con el mayor caudal utilizado en cada

pozo para los ensayos escalonados. Los círculos 26 y 33 presentan valores por encima de los circundantes. De la comparación entre ambas figuras, surge una clara concordancia. En ambas los máximos valores se encuentran en el rincón Noroeste y en el círculo 33.

6.6. RÉGIMEN DE SERVICIO

Para determinar las características y ubicación del equipo de bombeo, más convenientes para cada pozo, se adoptó como coeficiente de almacenamiento regional el valor $S =$

0.001, resultante del ensayo de acuífero realizado con pozos de observación a la perforación sb1. El

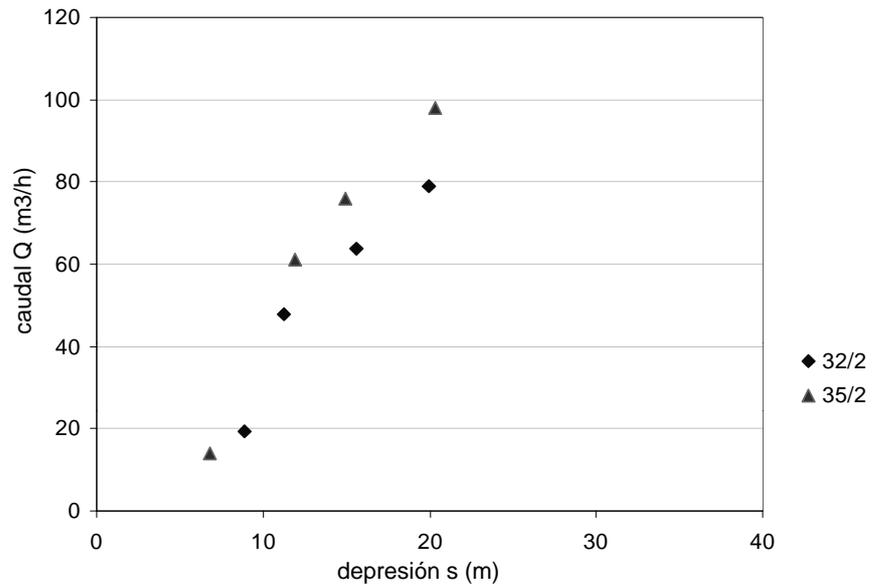


Figura 8: CURVAS Q/s - TIPO c

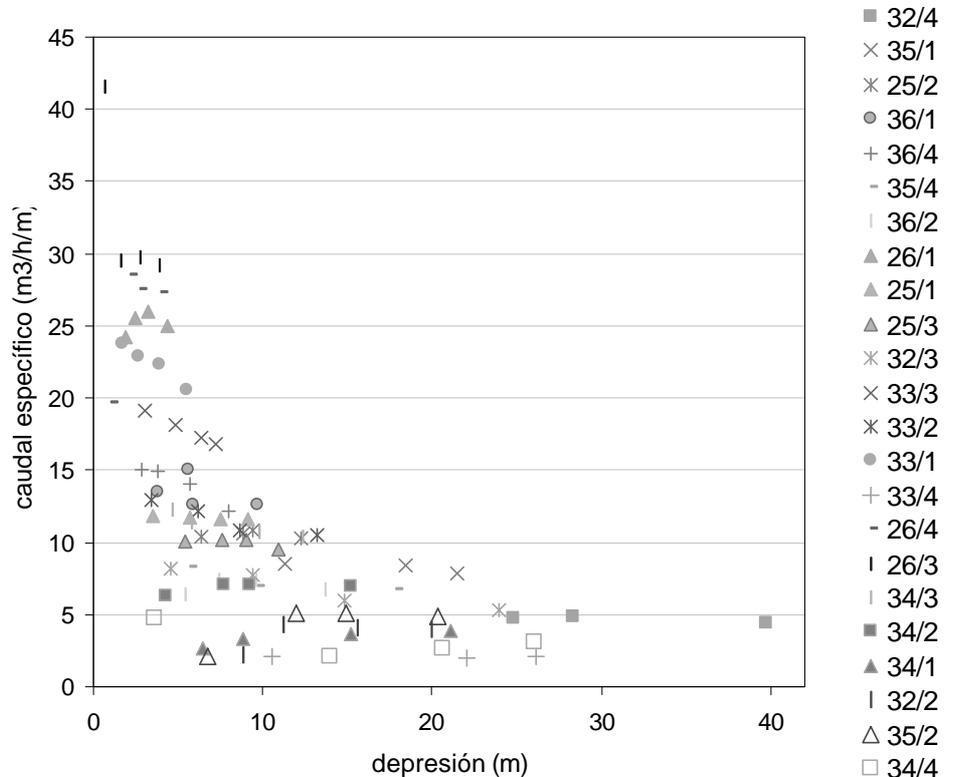


Figura 9: CURVAS CAUDAL ESPECÍFICO vs DEPRESIÓN

cálculo del nivel dinámico se realizó considerando que cada pozo está afectado por la interferencia hidráulica de un anillo, circundante a 900m al mismo, de seis pozos uniformemente distribuidos de similares características hidrodinámicas al ensayado.

Tanto la teoría como la experiencia adquirida con los pozos perforados en la zona indica que la eficiencia inicial, registrada durante los ensayos de corta duración, se incrementa con el tiempo. Por tal razón y con el fin de evitar la entrada de sólidos al sistema de riego, se preparó un régimen de servicio (para la primer temporada de trabajo) que contempla un caudal inicial de bombeo Q_i , que deberá aumentar diariamente un 5% en forma gradual y progresiva, hasta lograr el caudal máximo Q_{mx} aconsejado para cada pozo.

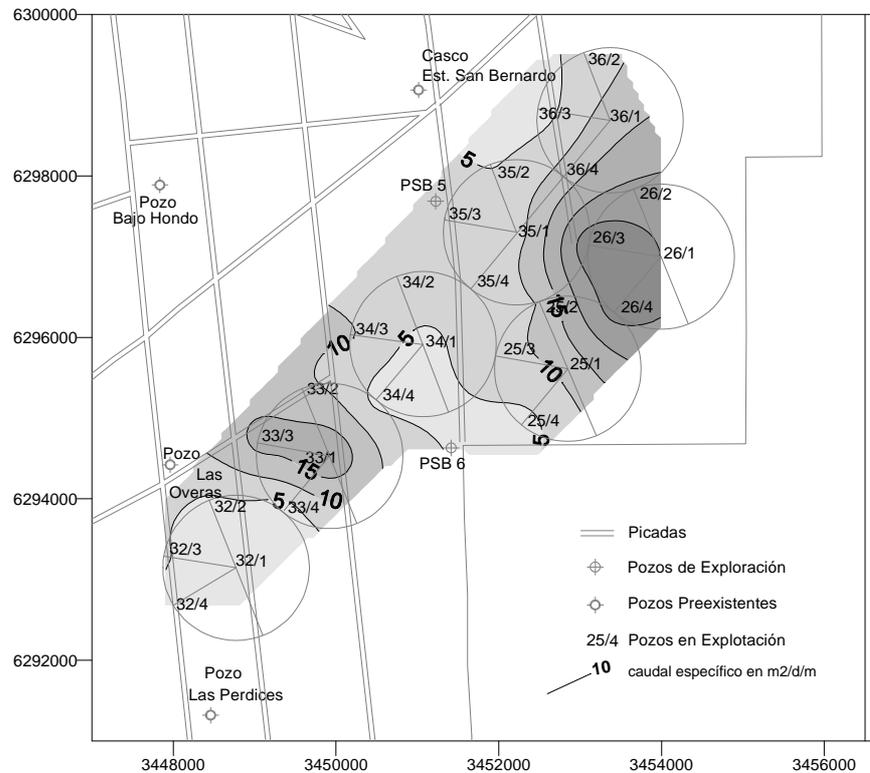


Figura 10. Distribución de los caudales específico en m²/día/m

El cuadro 1 muestra, a título de ejemplo, el esquema utilizado para determinar el régimen de servicio del pozo sb12, con una profundidad de captación de 135 m. El sector superior presenta los valores del rendimiento específico Q/sr , registrados para cada caudal del ensayo escalonado. También muestra los caudales característicos Q/st correspondientes al valor de transmisividad, calculados a partir de los registros de recuperación del escalón de mayor caudal, y al coeficiente de almacenamiento regional estimado en $S = 0.001$.

Para la determinación del régimen de servicio se partió de dos condiciones:

- El nivel dinámico inicial recomendado (N_{di}) no debe superar la profundidad del techo del primer filtro $TeES = 71m$ durante el primer día de bombeo.
- A los 80 días de bombeo continuo, el descenso del agua en el pozo bombeado no deberá superar el nivel dinámico límite $N_{dlim} = 90m$.

El sector inferior comienza exponiendo las depresiones calculadas, para el pozo de bombeo y para el pozo de interferencia, a un día y a ochenta días desde que se iniciara el bombeo. Más abajo, en la mitad izquierda, se calcula la depresión en el pozo bombeado para un rango de eficiencias entre 30% y 90%, sin considerar la interferencia de los pozos circundantes. A la derecha se calculan las profundidades

del nivel dinámico, considerando la interferencia de seis pozos. En el último renglón de la primera mitad

Pozo 35-2 (SB12)

Recuperación de 180 minutos de bombeo

Theis: $s = Q \cdot W(u) / 4 \pi \cdot kD$								
Q(m ³ /h)	kD	S	t(día)	r	s	Q/4Pi*kD	u	W(u)
98	330	1,0E-03	0,125	0,20	8,312	0,56717082	2,424E-07	14,6553608
98	330	1,0E-03	80	0,20	11,977	0,56717082	3,788E-10	21,1168288
98	330	1,0E-03	1	900	0,251	0,56717082	6,136E-01	0,44212833
98	330	1,0E-03	80	900	2,439	0,56717082	7,670E-03	4,30081917
Q/st = 11,79	m³/h/m		Q/sr = 4,81	m³/h/m		EF=(Q/st)/(Q/sr)= 41%		
75	330	1,0E-03	0,063	0,20	6,060	0,4340593	4,848E-07	13,9622139
Q/st = 12,38	m³/h/m		Q/sr = 5,10	m³/h/m		EF=(Q/st)/(Q/sr)= 41%		
61	330	1,0E-03	0,063	0,20	4,929	0,3530349	4,848E-07	13,9622139
Q/st = 12,38	m³/h/m		Q/sr = 5,10	m³/h/m		EF=(Q/st)/(Q/sr)= 41%		
14	330	1,0E-03	0,063	0,20	1,131	0,0810244	4,848E-07	13,9622139
Q/st = 12,38	m³/h/m		Q/sr = 2,06	m³/h/m		EF=(Q/st)/(Q/sr)= 17%		

RÉGIMEN DE SERVICIO

PROFUNDIDADES CALCULADAS PARA LA INTERFERENCIA DE SEIS POZOS

CÁLCULOS PARA EL CAUDAL INICIAL								
Q(m ³ /h)	kD	S	t(día)	r	s	Q/4Pi*kD	u	W(u)
95	330	1,0E-03	1	0,20	9,201	0,54980845	3,0303E-08	16,7348021
95	330	1,0E-03	80	0,20	11,610	0,54980845	3,7879E-10	21,1168288
95	330	1,0E-03	1	900	0,243	0,54980845	0,61363636	0,44212833
95	330	1,0E-03	80	900	2,365	0,54980845	0,00767045	4,30081917
DEPRESION en metros			PROFUNDIDAD DEL NIVEL DINÁMICO en metros					
Sin interferencia			Con interferencia de 6 pozos					
	80 días	1 día		80 días	1 día			
EF 90%	12,90	10,22		Prof.= 77,53	62,12			
EF 80%	14,51	11,50		Prof.= 79,14	63,40			
EF 70%	16,59	13,14		Prof.= 81,21	65,04			
EF 60%	19,35	15,33		Prof.= 83,98	67,23			
EF 50%	23,22	18,40		Prof.= 87,85	70,30			
EF 40%	29,03	23,00		Prof.= 93,65	74,90			
EF 30%	38,70	30,67		Prof.= 103,33	82,57			
C= 5,8E-07	n= 2			Prof.Ne+BQ+CQ^n=		79,25	64,11	
NE(m)= 50,44	PiES(m)= 135	TeES(m)= 71		ND lím.(m)= 90				
CÁLCULOS PARA EL CAUDAL MÁXIMO RECOMENDADO								
Q(m ³ /h)	kD	S	t(día)	r	s	Q/4Pi*kD	u	W(u)
105	330	1,0E-03	1	0,20	10,169	0,60768302	3,0303E-08	16,7348021
105	330	1,0E-03	80	0,20	12,832	0,60768302	3,7879E-10	21,1168288
105	330	1,0E-03	1	900	0,269	0,60768302	0,61363636	0,44212833
105	330	1,0E-03	80	900	2,614	0,60768302	0,00767045	4,30081917
90			PROFUNDIDAD DEL NIVEL DINÁMICO en metros					
Sin interferencia			Con interferencia de 6 pozos					
	80 días	1 día		80 días	1 día			
EF 90%	14,26	11,30		Prof.= 80,38	63,35			
EF 80%	16,04	12,71		Prof.= 82,16	64,76			
EF 70%	18,33	14,53		Prof.= 84,45	66,58			
EF 60%	21,39	16,95		Prof.= 87,51	69,00			
EF 50%	25,66	20,34		Prof.= 91,79	72,39			
EF 40%	32,08	25,42		Prof.= 98,20	77,48			
EF 30%	42,77	33,90		Prof.= 108,90	85,95			
C= 5,8E-07	n= 2			Prof.Ne+BQ+CQ^n=		82,64	65,90	
Q _i (m ³ /h)= 95	N _{di} (m)= 70		Q _{mx} (m ³ /h)= 105		N _{dx} (m ³ /h)= 84			

Cuadro 1: RÉGIMEN DE SERVICIO Y CÁLCULO DE LA BOMBA.

del cuadro se exhibe la profundidad del nivel del agua, calculado esta vez a partir de la “función del pozo” obtenida como resultado del ensayo escalonado.

Los valores de arranque para el cálculo se presentan en la fila que divide este cuadro en dos mitades.

Mientras que los cálculos de la mitad superior del cuadro se realizaron para que el nivel dinámico cumpla la condición (a), en la mitad inferior se repiten los cálculos pero ahora con el fin de cumplir con la condición (b).

En el último renglón del cuadro se presentan los caudales adoptados, junto a los valores de profundidad del nivel dinámico, calculados como el promedio entre la profundidad obtenida a partir de la transmisividad (ensayo de recuperación) y la profundidad resultante de aplicar la ecuación del pozo $s = BQ + CQn$ (ensayo escalonado).

6.7 MODELO MATEMÁTICO

El 20/10/99, mientras se realizaban pruebas de riego a los máximos caudales recomendados, se registraron las depresiones en los pozos correspondientes al círculo 36 y al pozo sb1. Con los valores de transmisividad resultantes de los ensayos de recuperación y adoptando un coeficiente de almacenamiento regional $S = 0.001$, se preparó un modelo capaz de simular las depresiones a partir de dichos valores. Para resolver este modelo, se aplicó un programa por computación que permite calcular los descensos en cualquier punto de la superficie a simular. Con este método se puede conocer no solamente los descensos de la superficie piezométrica en su conjunto; sino también los descensos producidos en los pozos de explotación sometidos a bombeos intensivos, incluyendo las pérdidas de carga por la eficiencia de los mismos.

El cálculo de descensos por puntos mediante modelos matemáticos digitales fue desarrollado mediante un programa que calcula los descensos adimensionales a partir de la ecuación de THEIS..

El programa PRIDOSAN aplicado (BUCICH, N. 1988) utiliza las funciones de KERNEL, para resolver la ecuación de THEIS con lo que se obtiene mayor precisión en los casos en que el tiempo de predicción sea elevado, o la distancia al punto de observación sea pequeña.

El programa PRIDOSAN posee las siguientes características:

- a) Calcula descensos (o ascensos) de nivel del agua en cualquier punto de observación de un acuífero confinado o libre sin drenaje diferido, afectado por uno o más puntos de extracción o recarga.
- b) Acepta valores diferentes de la Transmisividad (kD) y el Coeficiente de almacenamiento (S) en cada pozo de bombeo o de inyección.

- c) Posibilita la determinación de la depresión para sucesivos pasos de tiempo.
- d) Permite simular caudales variables para cada pozo y para cada paso de tiempo.
- e) Se obtiene para cada punto de observación la variación (ascenso o depresión) discriminada por cada uno de los puntos que afectan el sistema.

Con el fin de evaluar los parámetros hidrodinámicos calculados mediante las pruebas de bombeo, se realizó una simulación con el modelo descrito anteriormente, para 14 hs. de bombeo, a los caudales observados. La tabla 1, sintetiza algunos parámetros principales de los pozos bombeados y las depresiones simuladas. También se muestran las diferencias entre las depresiones medidas y las calculadas.

DEPRESIONES CALCULADAS Y MEDIDAS

Perforación	36/1	36/2	36/3	36/4
Transmisividad m ² /día	1600	890	450	1600
Caudal m ³ /día	3768	3480	1848	4056
Depresión por 36/1	3,44	0,21	0,21	0,22
Depresión por 36/2	0,22	5,53	0,21	0,06
Depresión por 36/3	0,23	0,23	5,81	0,28
Depresión por 36/4	0,35	0,18	0,39	3,84
Depresión ef. 100%	4,24	6,14	6,62	4,39
Eficiencia	46%	23%	24%	24%
Depresión calculada	8,28	24,64	25,01	16,55
Depresión medida	10,84	26,36	26,83	19,86
Diferencia	2,50	1,72	1,82	3,31
Error porcentual	24	7	7	17

Tabla 1. Isodepresiones simuladas

La diferencia entre las depresiones medidas y calculadas, con un valor medio de 2.35, es bastante uniforme. No ocurre lo mismo con el error porcentual entre dichos parámetros. Se observa muy buen ajuste para los pozos 36/2 y 36/3, con errores porcentuales menores que 10%, aunque no ocurre lo mismo con los otros dos pozos.

La figura 11 exhibe el mapa de depresiones obtenido como resultado de la corrida mencionada.

7. CONCLUSIONES

La notoria analogía verificada entre los mapas de Transmisividad kD , de Caudal característico Q/s - resultantes de las pruebas de bombeo- (figuras 5 y 10) y el mapa de la Resistencia Transversal de la Capa de Interés (figura 4), confirman las hipótesis utilizadas en la selección de la zona para ejecutar los primeros pozos de riego.

Los resultados de la corrida del modelo para 14 horas de bombeo muestran un ajuste aceptable

con los valores de campo. Para disminuir el error de pronóstico, debieran utilizarse métodos más precisos para la determinación de los valores locales de la transmisividad del acuífero, así como de la eficiencia de los pozos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades de la empresa **SER ARGENTINA SA**, y muy especialmente al Ing. Giovanni Capello, la autorización para la publicación de este trabajo.

8. BIBLIOGRAFIA:

CRIADO ROQUE, P.;
MOMBRÚ, C.A. y
MORENO, S. (1981).
Sedimentitas
Mesozoicas. En
geología de la Provincia
de San Luis, VIII
Congreso Geológico
Argentino; Rel: 79-96.

CRIADO ROQUE, P.; MOMBRÚ, C.A. y RAMOS, V.A. (1981). Estructura e Interpretación Tectónica. En geología de la Provincia de San Luis, VIII Congreso Geológico Argentino; Rel: 155-192.

CUSTODIO, E. Y LLAMAS, M. R. (1976): Hidrología Subterránea, tomos 1 y 2. Ediciones Omega, Barcelona.

DUPRAT, A.; SIMLER, L., Y UNGEMACH, P. (1970): "Contribution de la prospection électrique à la recherche des caractéristiques hydrodynamiques d'un milieu aquifère", *Terres et Eaux*, 23, 23-31.

HENRIET, J. P. (1976): "Direct applications of the Dar Zarrouk Parameters in Ground Water Surveys", *Geophysical Prospecting*, vol. XXIV, núm. 2.

MAILLET, R. (1947). The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics* 12:529-556

TAMÉS, C. (1965). Utilización de aguas saladas para riego. Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas. Madrid.

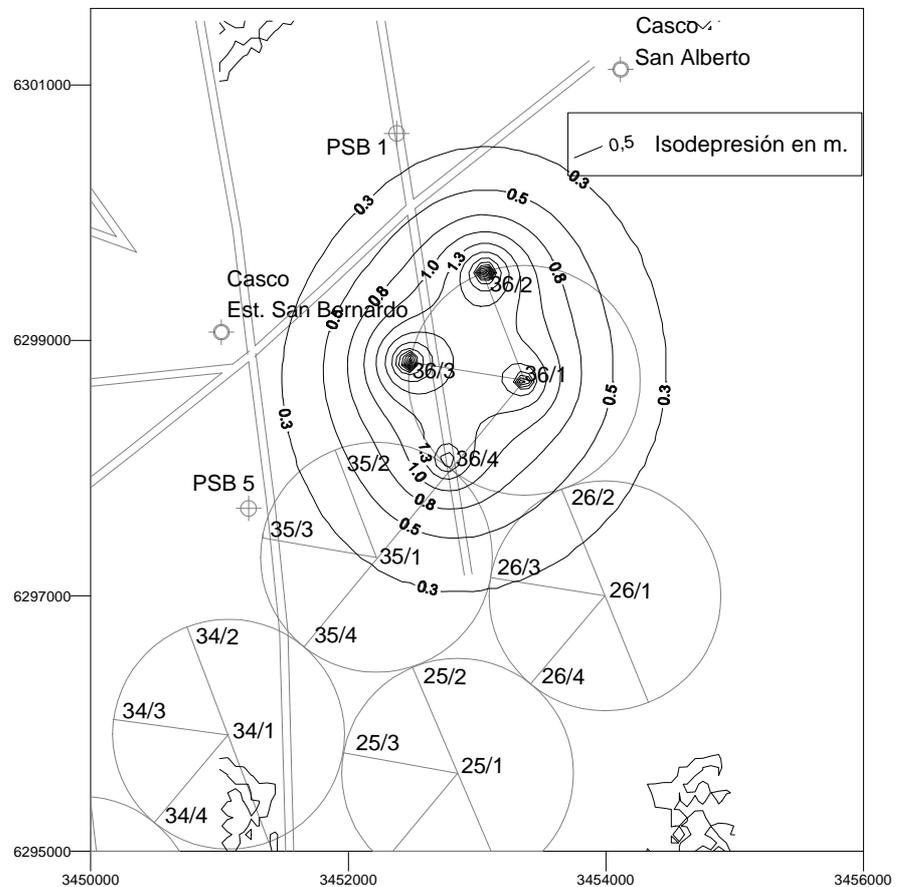


Figura 11. Isodepresión - Tiempo de bombeo: 14 horas