

MECANISMO DE SALINIZACIÓN DE ACUÍFEROS EN LA ZONA NORTE DE MENDOZA

Amilcar Alvarez¹, Juan Victoria², Jorge Villalba¹, Nicolás Martinis¹,

⁽¹⁾Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino

⁽¹⁾Belgrano 210 M5500FIF Mendoza. TeleFax: 0261 428 8251 E-mail: cra@ina.gov.ar

⁽²⁾Instituto Nacional del Agua - Centro Regional de Agua Subterránea

⁽²⁾José Ignacio de la Roza 125 (O) San Juan

RESUMEN

Los estudios hidrogeológicos realizados en la cuenca Norte de la provincia de Mendoza, ponen de manifiesto procesos de contaminación por salinización de acuíferos en un sector del departamento San Martín. Allí se definió un sistema de zonación hidroquímica vertical de tres niveles de explotación diferenciados por su salinidad con mayor mineralización en los niveles superiores.

En principio se desarrolló la hipótesis de salinización por intrusión de aguas de elevada salinidad provenientes de acuíferos suprayacentes como consecuencia de sobreexplotación de acuíferos y por perforaciones en mal estado que poseen roturas provocadas por corrosión de las cañerías de aislamiento.

El estudio efectuado permitió conocer mejor la ubicación, extensión, origen y evolución del proceso de salinización, ajustar la interpretación geológica del subsuelo y cuantificar ingresos y egresos hídricos en el área.

La medición de niveles estáticos de los tres niveles para el período estival, muestra que entre el primero y segundo nivel y entre el segundo y tercer nivel de explotación existen diferencias de niveles de agua que crean un gradiente vertical positivo.

La información obtenida se procesó a través de la simulación matemática simplificada utilizando el modelo de flujo y transporte de masa denominado Modflow.

Operando el modelo se observó, al cabo de 20 años de simulación, que la salinidad en las capas más profundas aumenta notablemente. El fenómeno de avance vertical de la salinización se muestra más lento conforme la profundidad se hace mayor siendo este proceso irreversible en las condiciones actuales y continuará, con más ó menos intensidad, durante el transcurso del tiempo.

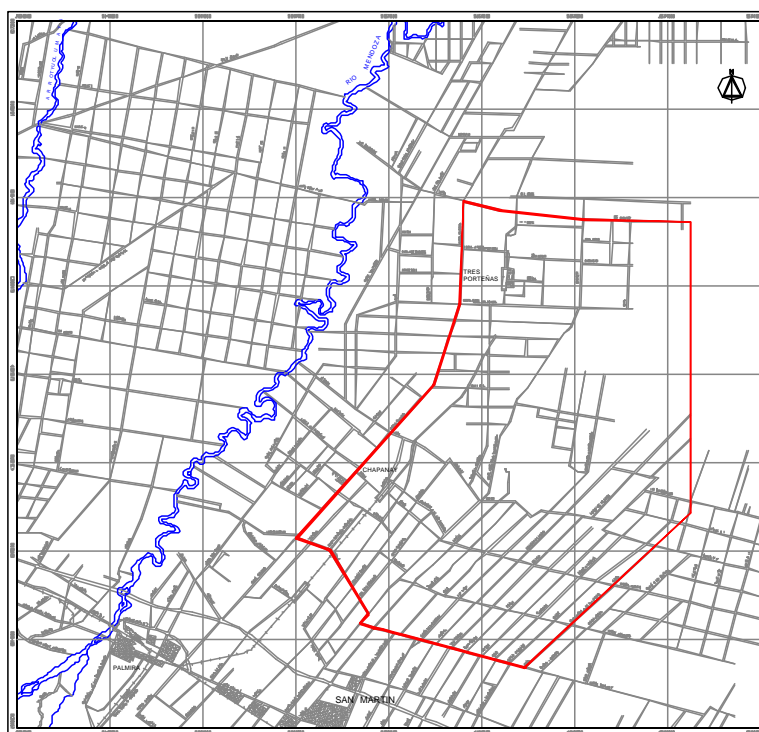
Con el modelo se prueban diversas alternativas tales como bombeo máximo sin riego superficial, riego superficial exclusivo y combinaciones intermedias, determinándose que la situación empeora cuando toda el agua proviene de la red de riego debido a las pérdidas de la red de riego, las que son nulas cuando se usa exclusivamente agua subterránea

Palabras clave: salinización – contaminación – agua subterránea - riego

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo corresponde al estudio hidroquímico del proyecto “Estudio del proceso de salinización de acuíferos en la zona este del oasis norte – Pautas de manejo para la mitigación y corrección”, según convenio entre el Departamento General de Irrigación (DGI) y el Instituto Nacional del Agua (INA)

Este proyecto se desarrolló mediante un trabajo interdisciplinario que comprendió las especialidades de Hidrología, Hidroquímica y Modelo Matemático.



Ubicación del área de estudio

HIDROLOGÍA

Materiales y métodos

Se realizó un censo propiedades y pozos permitió la ubicación, estado, características constructivas y mecánicas de las perforaciones de los tres niveles de explotación y el estado de las perforaciones en las que pudo efectuarse ensayos seriados correspondientes.

Se confeccionó una red de perforaciones en buen estado de los tres niveles de explotación para las mediciones hidrológicas obteniendo la cota mediante nivelación geométrica.

La medición de niveles estáticos se realizó durante los meses de noviembre y diciembre de 2002 En esos meses, los acuíferos son explotados intensamente por lo que los datos de nivel registrados están afectados por la perturbación de los acuíferos y no de quietud o de mínimo bombeo, aspecto que se manifiesta durante el período invernal.

Discusión

En el primer nivel de explotación la mayoría de los pozos han sido abandonados por lo cual no se ha podido cubrir toda el área de trabajo. Por lo tanto los datos de la medición de niveles piezométricos se consideran insuficientes.

En el segundo nivel de explotación ha sido posible medir 31 perforaciones, en general con una buena distribución areal, que ha permitido obtener información para una adecuada representación piezométrica de toda el área de estudio.

En el tercer nivel de explotación se obtuvieron datos de nivel del agua subterránea en solo 7 perforaciones, que en conjunto no representan adecuadamente toda el área de estudio. Las curvas piezométricas que se pudieron trazar solo son representativas del sector centro-oeste del área de trabajo.

Parámetros hidráulicos

En el área de estudio se han realizado hasta el presente 25 pruebas de bombeo con el objeto de conocer los parámetros que gobiernan el comportamiento de los acuíferos de los tres niveles de explotación. De esta manera se obtuvo información de las permeabilidades, coeficientes de almacenamiento, caudales específicos, coeficientes de goteo y percolancia de los acuíferos que se explotan en ese sector del oasis regado.

Información y método

Los ensayos de bombeo con pozos de observación durante el régimen no permanente permiten determinar la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento con uno o más puntos de observación, distintos del pozo de bombeo. Aun con sólo el pozo de bombeo se puede obtener la permeabilidad con razonable aproximación.

Por presentar ciertas ventajas en cuanto a costo, resultados y problemas prácticos, ha sido elegido este método de trabajo para la valoración de los resultados de las pruebas de bombeo.

Un importante complemento del ensayo anterior son los ensayos de recuperación que se realizaron en los pozos que lo permitieron..

En este caso, se optó por la ejecución de los ensayos en régimen no estacionario, cuyo método de análisis e interpretación para el caso de acuíferos confinados y libres fue el de Theis y Jacob. Para los acuíferos semiconfinados se utilizó Jantush.

HIDROQUÍMICA

Introducción

A partir de los estudios hidroquímicos realizados por el CRAS en la cuenca norte de la provincia se determinó un proceso de salinización de acuíferos en un vasto sector de la zona central de la cuenca. Como consecuencia de ello el DGI resuelve declarar área de restricción de nuevas perforaciones a un área de unas 23.027 Ha del departamento San Martín con la finalidad de intentar atenuar el proceso de salinización mientras se realizan los estudios pertinentes.

Los estudios que se están desarrollando tienden a conocer con mas precisión la ubicación, extensión, origen y evolución del proceso, ajustar la interpretación geológica del subsuelo y

cuantificar ingresos y egresos hídricos en el área, a fin de establecer las bases para un manejo racional e integrado del recurso hídrico, definiendo pautas adecuadas para su saneamiento.

Materiales y métodos

Antecedentes hidroquímicos

En la cuenca hidrogeológica Mendoza Norte está definida una zonación hidroquímica vertical en tres niveles de explotación diferenciados principalmente por su grado de salinidad, la que en general disminuye con la profundidad.

El primer nivel de explotación tiene profundidades de explotación inferiores a los 80 metros, que por su elevada salinidad no se explota y ha sido abandonado y reemplazado por otras perforaciones mas profundas.

El segundo nivel de explotación tiene una profundidad de explotación comprendida entre los 100 y 180 metros aproximadamente. En este nivel de explotación se observaron distorsiones de salinidad muy marcadas determinantes de un proceso de salinización de acuíferos.

Actualmente este nivel es el mas explotado del área aunque las nuevas perforaciones de sustitución que se realizan tienen sus filtros en el tercer nivel que supera los 200 metros de profundidad.

En este tercer nivel de explotación en general no se han producido variaciones relevantes de las condiciones hidroquímicas naturales definidas mediante la información de base conocida

Método de trabajo

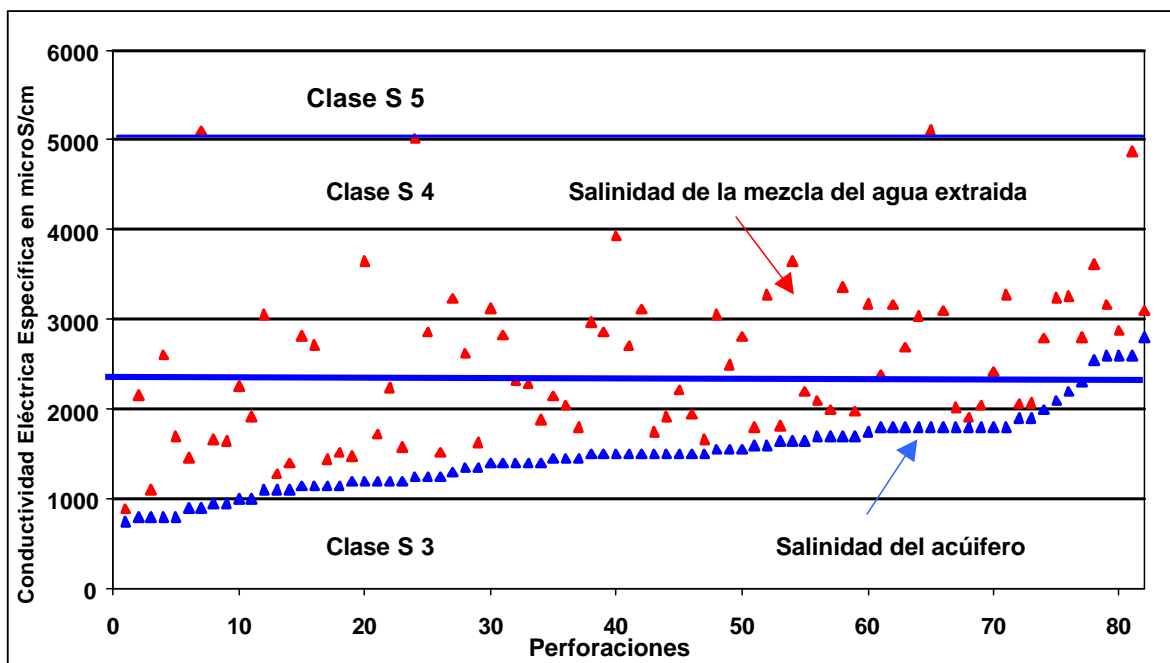
Las propiedades censadas en el área son 1622 que suman 23.100 Ha de las cuales 13512,41 están cultivadas. De estas solo 436,41 Ha tienen riego presurizado lo que representa un 3,23%.

Las perforaciones censadas en el área suman 1014 de las cuales solo 590 estaban activas en el momento que se desarrollaron las tareas censales.

Las perforaciones que componen la red monitora hidroquímica e hidrológica deben estar en buen estado y los filtros enfrentados al espesor acuífero en inspección, correspondiente a cada uno de los tres niveles de explotación existentes. Estas condiciones son ineludibles.

Por esta razón se ha establecido como rutina la realización de ensayos hidroquímicos seriados en las perforaciones para comprobar su estado previo a la toma de muestras (B.4.)

Con la información obtenida a través de los ensayos se determinó que el 52,9% de las perforaciones se encuentran en mal estado. Esto significa que un elevado porcentaje del parque de perforaciones extrae una mezcla de agua que ingresa a la perforación desde el acuífero explotado originalmente a través de los filtros y agua de mala calidad que ingresa a través de una posible rotura en la cañería de entubación. En estos casos como se ilustra en el siguiente gráfico se está extrayendo agua de inferior calidad que la del acuífero explotado, que al ser utilizada en regadío seguramente se traduce en una merma de productividad de los cultivos.



De acuerdo a lo programado se seleccionaron perforaciones en buen estado para conformar las redes estratificadas de monitoreo hidroquímico e hidrológica de manera de obtener información de los tres niveles de explotación con una buena distribución areal para la interpretación.

Para la confección de estas redes de monitoreo se presentó el inconveniente de la escasez de perforaciones activas en buen estado que exploten el primero y tercer nivel.

La red de monitoreo hidroquímico se pudo conformar con 9 perforaciones del primer nivel, 47 del segundo y 32 del tercero con lo que se programó y ejecutó el muestreo para análisis químico.

En campaña se extrajeron las muestras de agua subterránea correspondientes de acuerdo a técnicas de muestreo especificadas. Luego de medir "in situ" la conductividad eléctrica específica y la temperatura, se envasó e individualizó cada muestra y se enviaron al laboratorio químico del CRAS ubicado en la provincia de San Juan donde se realizaron determinaciones de los iones principales (calcio, sodio, potasio, magnesio, carbonato, bicarbonato, sulfato, cloruro y nitrato), fluoruro y boro.

La red de perforaciones seleccionadas para monitoreo hidrológico debe también cumplir con la condición de poder introducirse la cinta de medición por lo que finalmente esta red quedó constituida por 4 pozos del primer nivel, 31 del segundo y 7 del tercero.

Los niveles estáticos se midieron en la época de mayor bombeo de acuerdo a lo programado y fuera de programa se midieron en junio, que es una época de bombeo menos intensivo. Este último monitoreo se efectuó a fin de observar las diferencias entre ambos periodos y de esa manera tener información para cuantificar las diferencias producidas por la explotación y analizar de esta manera su posible relación con ingresos verticales inducidos a partir de los espesores acuíferos suprayacentes y su vinculación con el proceso de salinización.

Resultados

Evaluación hidroquímica

Con la información obtenida de salinidad expresada en Conductividad Eléctrica Específica se confeccionaron mapas hidroquímicos con curvas de igual salinidad de cada uno de los tres niveles de explotación.

La información de composición química del primero, segundo y tercer nivel de explotación se volcó en diagramas de PIPER para su caracterización hidroquímica (Fig.1) Los valores de salinidad y de RAS se volcaron en diagramas de WILCOX, utilizado para la clasificación del agua para riego.

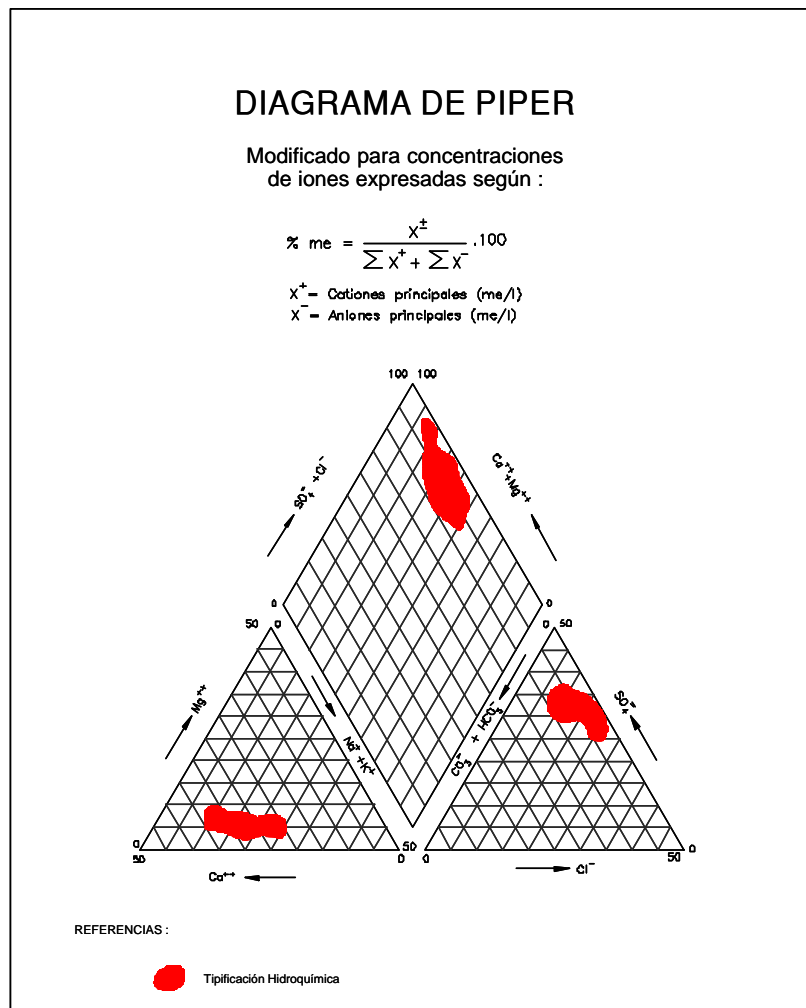


Figura 1. Diagrama de Piper

Primer Nivel de Explotación

Las isolíneas obtenidas representan una *situación de salinidad referencial* obtenida con datos de los últimos períodos de muestreo y escasa información actual debido a que por la elevada salinidad alcanzada en el área de estudio, este nivel prácticamente ha dejado de explotarse.

De todas formas la información regional del nivel más superficial de la cuenca sirve como referencia indicativa de los riesgos de contaminación de acuíferos subyacentes. De esta manera las curvas de isosalinidad obtenidas muestran valores que oscilan entre 3400 y 5500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Se considera muy importante lograr información actualizada de este nivel para los estudios de salinización del segundo nivel de explotación que se están desarrollando ya que esta se produce como consecuencia de la interacción entre ambos niveles inducida por acciones antrópicas.

Como se ha destacado en informes anteriores la salinidad del agua subterránea de este nivel no sigue un comportamiento correlacionable con el movimiento del agua en el acuífero. Los cambios laterales en este nivel de explotación están más relacionados a efectos locales de salinización por percolación de excedentes de riego y proximidades del manto freático al nivel del terreno. Estos procesos han provocado una salinización progresiva del acuífero en sectores cada vez más extensos de la cuenca a partir de la explotación agrícola. La salinización comienza en los primeros metros del espesor saturado y se extiende por diversos procesos, en los que la dispersión mecánica es el preponderante, acompañando el movimiento del agua subterránea en su desplazamiento horizontal. Las variaciones de nivel y los efectos hidrodinámicos de la explotación y procesos de difusión y convección salina han producido con mayor rapidez la salinización vertical del primer nivel de explotación, la cual se verá frenada únicamente por la presencia de materiales menos permeables con extensión areal significativa.

Segundo Nivel de Explotación:

La calidad del agua subterránea de la mayor parte del área de estudio de este nivel de explotación está actualmente comprometida por su elevada salinidad que varía de oeste a este entre 2500 y 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Para evaluar los cambios de salinidad producidos en este nivel de explotación en el área de estudio se preparó un mapa con zonas de salinidad del agua subterránea de toda la cuenca norte inspeccionada que muestra la variación entre el período de base 1979/82 y 2002 (Fig. 2)

En un pequeño sector ubicado al noroeste de la localidad Tres Porteñas se introduce una cuña con salinidades variables entre 1000 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y al sureste del área entre la calle Rosas y Funes se observan valores que oscilan entre 1500 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Al sur del área en la zona comprendida aproximadamente entre la calle Alto Salvador al oeste, carril Montecaseros al este y calle Ñango al norte tiene salinidades variables entre 1800 y 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

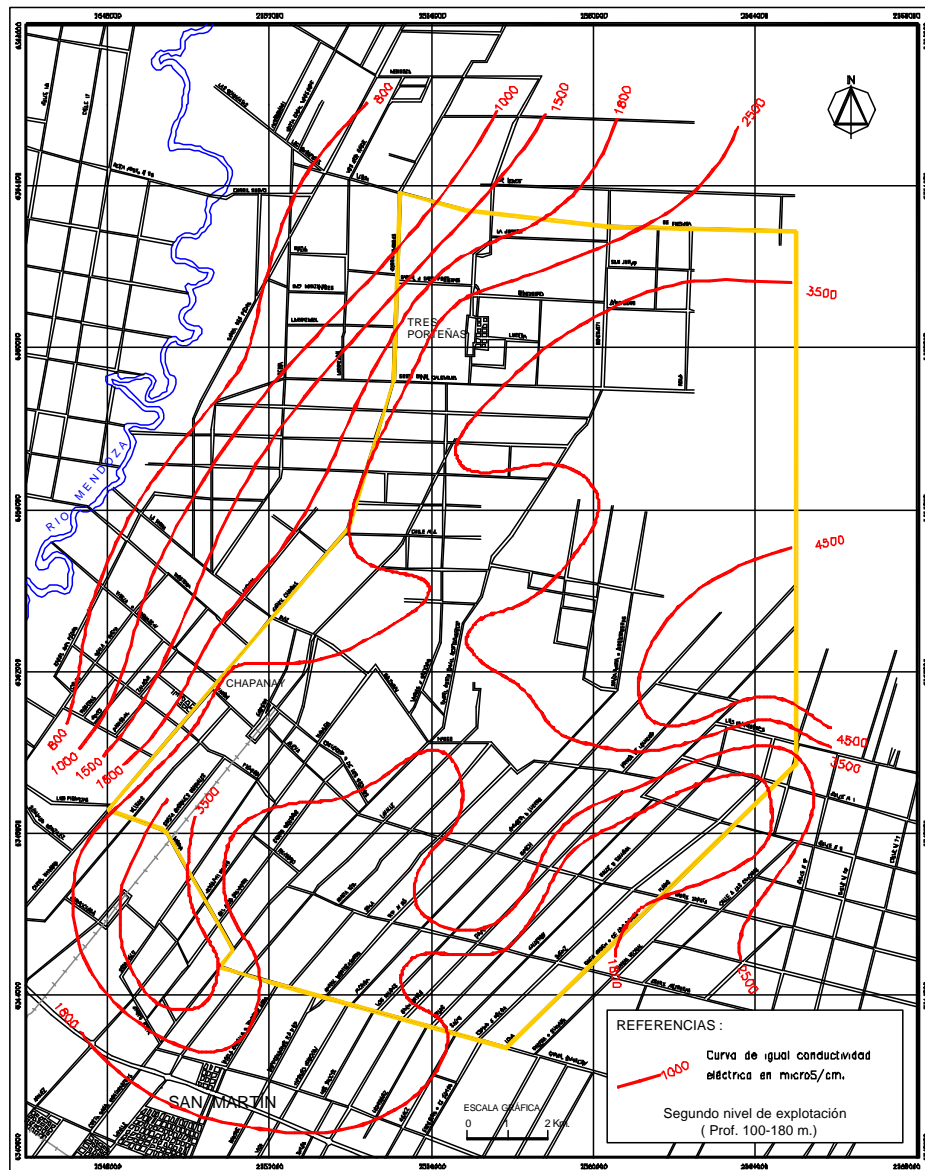
Tercer Nivel de Explotación

Este nivel es el menos expuesto a procesos de contaminación de origen exógeno. En general presenta una salinidad y composición química que se correlaciona con los procesos lógicos de la evolución natural del agua en las formaciones acuíferas desde las áreas de recarga.

La salinidad varía prácticamente en toda el área de estudio aproximadamente en el sentido del flujo subterráneo desde valores de 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al oeste a valores de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ al este.

Caracterización hidroquímica

Para investigar si existen diferenciaciones hidroquímicas sustanciales entre los distintos niveles de explotación y a partir de ellas evaluar las hipótesis sobre el origen del incremento de salinidad detectado, principalmente en el segundo nivel de explotación, se utilizó la caracterización hidroquímica.



La caracterización hidroquímica se efectuó en función de las concentraciones relativas de los iones principales, nombrando de mayor a menor los que superan una concentración relativa previamente acordada. En nuestro caso el criterio adoptado para caracterizar la tipología hidroquímica de las fuentes muestreadas es que la concentración relativa de los iones determinantes sea superior al 20% de la suma de las concentraciones en meq/l de los iones principales.

La concentración iónica relativa obtenida de los análisis químicos efectuados se volcó en Diagramas de Piper, que es una metodología gráfica para el tratamiento de los datos químicos, basada en un diagrama múltiple trilineal que combina dos campos triangulares con uno romboidal. Cada campo triangular sirve para representar en un solo punto el porcentaje de los valores de reacción de los tres grupos catiónicos principales (calcio, magnesio, sodio + potasio) y aniónicos principales (carbonato + bicarbonato, cloruro y sulfato) El campo romboidal muestra el carácter químico total de un agua en un tercer punto que resulta de la proyección de los puntos representativos de los iones respectivos.

La ubicación relativa de los puntos en el diagrama permite caracterizar las aguas representadas. En el caso de una serie de análisis de una muestra se obtiene una dispersión de puntos que permiten estudiar las variaciones hidroquímicas vinculadas con factores espaciales y/o temporales. En asociación con la representación de otras fuentes a veces puede conocerse la influencia de los procesos de mezcla en las modificaciones hidroquímicas y los cambios debido a procesos químicos y fisicoquímicos.

Se prepararon diagramas de Piper representativos de la composición del primero y segundo nivel y del tercer nivel de explotación. La información hidroquímica actual del primer nivel de explotación es limitada como consecuencia de la escasez de perforaciones.

En los campos triangulares del diagrama de Piper donde se representa la composición química del agua del primero y segundo nivel (Fig.1) se observa una nube de puntos con aguas caracterizadas como sulfatadas cálcicas, sulfatadas cálcicas sódicas y cálcicas sulfatadas cloruradas. En el campo de los cationes existe una mayor dispersión del calcio comprendida aproximadamente entre 21 y 35 % meq y del sodio entre 7 y 25 % meq . En el campo de los aniones el sulfato varía entre 26 y 34 % meq y el cloruro entre 8 y 23 % meq.

Para el caso del tercer nivel de explotación la nube de puntos representativos tiene menor dispersión que el segundo nivel y está caracterizada principalmente como sulfatada cálcica sódica y sulfatada sódica cálcica y en algunos casos como sulfatada cálcica. Los iones más representativos están comprendidos entre los siguientes valores: sulfato entre 27 y 36 % meq, el calcio entre 19 y 29 % meq y el sodio entre 17 y 26 % meq.

La composición química del agua del tercer nivel está incluida en la nube de puntos representativos del primero y segundo nivel lo que indica que la diferenciación salina entre estos no comprende cambios producidos por aportes de aguas de origen diferente y que se pasa de un estado de salinidad a otro de mayor salinidad por procesos de concentración donde los cambios en la concentración iónica se deben fundamentalmente a precipitación de sales que superan su producto de solubilidad.

Del análisis de la información recopilada y obtenida para este proyecto se deduce que las grandes diferencias de salinidad entre las distintas fuentes y en general entre el primero y segundo nivel con el tercero se deben a procesos de concentración a partir de aguas de un mismo origen. Estos procesos se originan en el agua subterránea de los mantos acuíferos más superficiales que conforman el primer nivel de explotación por estar estas aguas sometidas a extracción para riego, concentración por evaporación en superficie, lixiviación e infiltración al mismo nivel de explotación.

Simultáneamente en el medio poroso saturado a partir de procesos de difusión, dispersión hidromecánica y convección la salinidad se extiende regionalmente transformándose en un proceso de contaminación difusa.

En mantos acuíferos más profundos que conforman el segundo nivel de explotación el fenómeno de concentración salina se debe a procesos de mezcla con aguas salinizadas del primer

nivel. Estos se producen por cambios en la dinámica de fluidos inducidos por el sobre bombeo del segundo nivel y en menor medida por la comunicación vertical que ocurre en las perforaciones con roturas en la cañería de entubación y/o deficiencia en el aislamiento.

Calidad del agua para riego

Se utilizó el diagrama de Wilcox para la clasificación de la calidad del agua para uso agrícola según su peligrosidad salina y sódica.

La peligrosidad salina se expresa en términos de Conductividad Eléctrica Específica a 25°C en un rango de 1000 a 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en forma logarítmica en el eje de las X. Dicha peligrosidad se divide en baja, media, alta y muy alta.

En la ordenada se representa la peligrosidad sódica definida en términos de relación de absorción de sodio (RAS) El rango de variación del RAS abarca desde 0 a 32 y comprende también cuatro clases de peligrosidad sódica con la misma denominación que la peligrosidad salina.

El segundo nivel, que actualmente es el más explotado que según esta clasificación posee aguas clase C3S1, C3S2, C4S1 y C4S2, mientras que la calidad del agua del tercer nivel está comprendida en las clases C3S1 y C3S2.

Evolución de la salinidad del segundo nivel de explotación

Los estudios hidroquímicos efectuados desde 1983 de la cuenca Norte permiten obtener información del agua subterránea para cada uno de los tres niveles de explotación y observar los cambios producidos en la salinidad, asumiendo los procesos de evolución a pesar de los inconvenientes técnicos derivados de la discontinuidad de los monitoreos que no responden a la metodología científica recomendada.

Es importante señalar que debido al tiempo transcurrido sin efectuar el control de la salinidad del agua subterránea fue muy difícil y en algunos casos imposible la obtención de información actual en algunos sectores de la cuenca. De esta manera se ha perdido el conocimiento de procesos evolutivos de horizontes acuíferos que dejaron de ser explotados y de otros salinizados que no es posible definir su comportamiento a lo largo de 10 años sin inspección.

El control de salinidad de la cuenca norte a través del monitoreo de una red estratificada de muestreo se efectuó en tres períodos, el primero está comprendido entre los años 1979/82, el segundo en el año 1992 y el tercero en el año 2002. El primer período es el que se toma de base para el análisis de los cambios temporales producidos en la calidad del agua subterránea, asumiendo como parámetro indicativo la salinidad expresada en términos de conductividad eléctrica específica.

Entre el primero y segundo monitoreo completo de la cuenca se efectuaron algunos controles de salinidad y estudios del estado de perforaciones en la zona central que permitieron detectar el proceso de salinización de acuíferos con ocurrencia principalmente en el segundo nivel de explotación en un área que está representada aproximadamente por salinidades que superan los 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el departamento San Martín, ésta zona abarca desde el oeste de Tres Porteñas y carril Chimbab la mayor parte del área de estudio y continúa hacia el este.

En el último monitoreo hidroquímico el proceso de salinización se manifiesta en un desplazamiento hacia el sur, hasta el carril Norte, de las curvas de 1800 y 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como puede apreciarse en la Figura 2. Esto representa un avance de la salinización que compromete un área mayor con salinidades que van desde 2500 a 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Bibliografía 5)

También se observa que se ha producido una disminución del tamaño de la cuña de agua con valores variables entre 1500 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que penetra hacia el este en la dirección del flujo subterráneo en una franja ubicada al sur del departamento San Martín.

En términos generales se observa un desplazamiento de las curvas de 800 y 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hacia el este del río Mendoza, hasta el carril Chimbas aproximadamente, indicando una influencia mayor de la recarga horizontal en sentido del flujo, atenuando la incidencia de las anomalías químicas producidas por la comunicación vertical inducida desde el primer nivel de explotación. En una zona ubicada al sureste de Tres Porteñas se nota una inflexión hacia el oeste de la curva de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo que indica un incremento de la salinidad.

Para el tercer nivel se observa respecto al período anterior y al igual que lo detectado en el segundo nivel que se ha producido un desplazamiento hacia el este del río Mendoza de las curvas de 800 y 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esto representa una disminución de la salinidad en sectores ubicados al oeste del carril Costa Canal Montecaseros, sin que se pueda definir una tendencia, no obstante está marcando una influencia mayor de la recarga horizontal en sentido del flujo lo que puede atenuar un efecto de salinización a partir de los niveles acuíferos suprayacentes.

Para evaluar los cambios de salinidad producidos en el segundo nivel de explotación en el área de estudio, se prepararon mapas de zonas de salinidad del agua subterránea de toda la cuenca norte inspeccionada para los tres períodos de monitoreo. Además se prepararon mapas donde se muestra la variación absoluta de la salinidad entre los periodos 1979/82 y 1992, entre los períodos 1992 y 2002 y uno que muestra la variación entre el período de base 1979/82 y 2002 (Fig. 3)

Las zonas de salinidad del segundo nivel para los tres períodos de monitoreo considerados muestran claramente como se deterioró la calidad del agua por el notable incremento de la salinidad. En el período de base la mayor parte del área de estudio tenía salinidades comprendidas entre 1200 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en dos pequeños sectores ubicados al noroeste y suroeste se podían apreciar salinidades comprendidas entre 1000 y 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un núcleo ubicado entre Tres Porteñas y Chapanay con salinidades variables entre 1800 y 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Para el monitoreo de la calidad del agua subterránea efectuado en 1992, la mayor parte del área de estudio tenía salinidades comprendidas entre 2000 y 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ observándose al oeste un sector con salinidades variables entre 3500 y 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mientras que en la zona sur se observaron salinidades comprendidas entre 1500 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en un pequeño sector del extremo noroeste salinidades de 1000 a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

El monitoreo más reciente efectuado en 2002 conjuntamente con el de la cuenca norte tiene en el área que se está considerando mayor densidad de información hidroquímica debido a que se muestreó la mayor parte de la población de perforaciones activas, siempre que estas estuviesen en buen estado según el ensayo seriado hidroquímico efectuado antes del monitoreo. En este monitoreo se pudo apreciar que continuó el deterioro de la calidad del agua del segundo nivel de explotación ya que se observa que la mayor parte del área tiene salinidades comprendidas entre 2500 y 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el pequeño sector noroeste mantiene su calidad anterior. Al sureste del área se observan salinidades entre 1500 y 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, donde anteriormente existían tenores de 1800 a 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esto último puede ser atribuido a la mayor densidad de información hidroquímica obtenida.

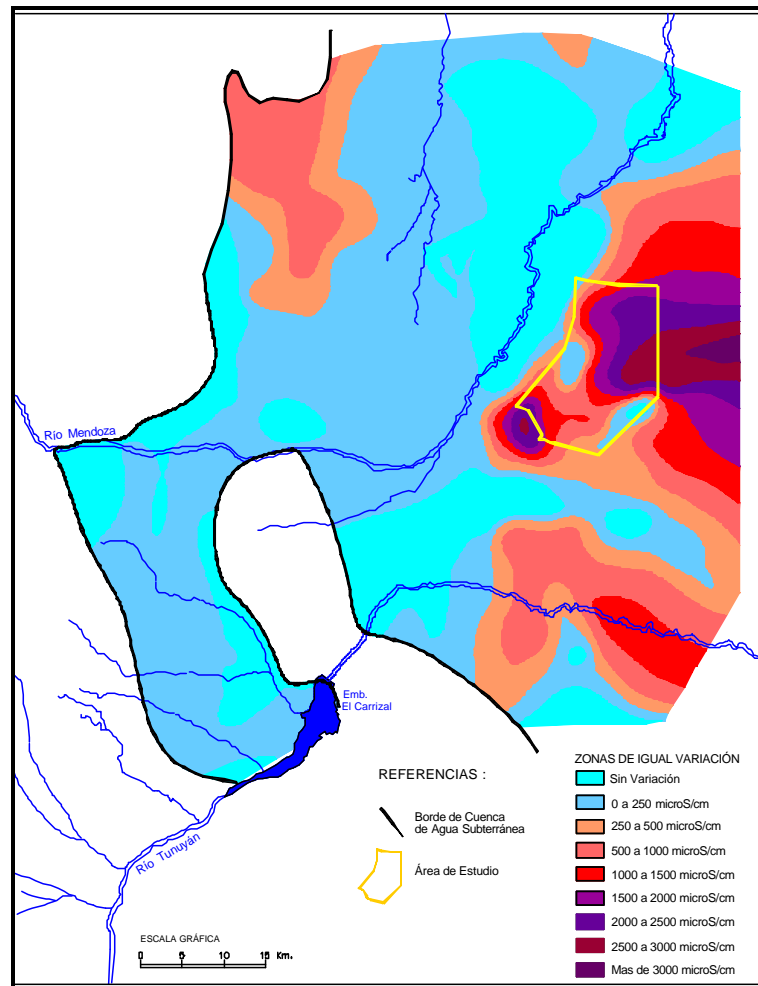


Fig. 3 Evolución de la salinidad período 1979-82 vs 2002 – segundo nivel de explotación

Teniendo en cuenta que el proceso de salinización se debe en mayor parte a una intrusión salina desde el primero al segundo nivel de explotación, producida por el cambio de dinámica de flujos generadas por el sobre bombeo en el segundo nivel de explotación, se efectuó una campaña (fuera de programa) de medición de niveles estáticos, en pozos de la red específica de este proyecto en el período de invierno (menor bombeo), a fin de comparar con el de verano (mayor bombeo) Esta información hidrológica junto a la obtenida en el período de verano es de suma utilidad para el análisis de la dinámica de flujos generados por el sobre bombeo y para la definición de pautas de manejo para la mitigación y corrección del proceso de salinización.

Con la información hidrológica obtenida se efectuaron los siguientes mapas: Isopiezas absolutas del primero, segundo y tercer nivel, curvas de igual profundidad del agua subterránea de verano para los tres niveles de explotación (Fig.4), curvas de igual profundidad del agua subterránea de invierno para los tres niveles de explotación (Fig.5) y diferencias de niveles entre invierno y verano para los tres niveles.

En esos mapas se aprecia claramente que en vastos sectores del área de estudio se producen diferencias notables de nivel del agua entre los tres niveles de explotación, con mayor amplitud en la época de máximo bombeo (Fig.4) De esta forma aumenta la profundidad del agua a medida que aumenta la profundidad de explotación siendo que naturalmente para este sistema hídrico subterráneo, de no existir condiciones claras de confinamiento, deberían ser semejantes. Estas

diferencias de niveles como se dijo anteriormente están muy atenuadas en el período de invierno o menor bombeo (Fig.5)

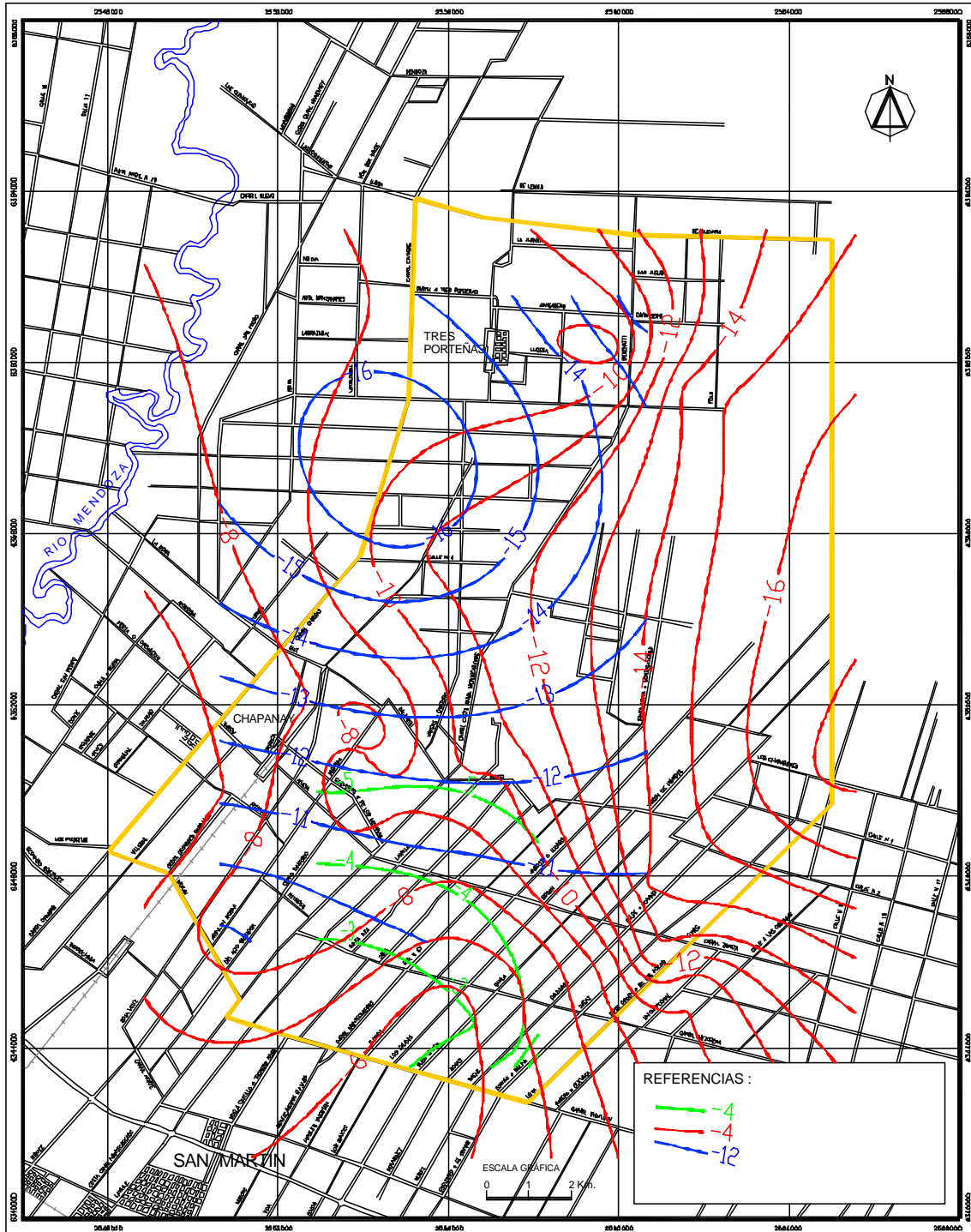


Figura 4. Curvas de igual profundidad de agua subterránea en verano

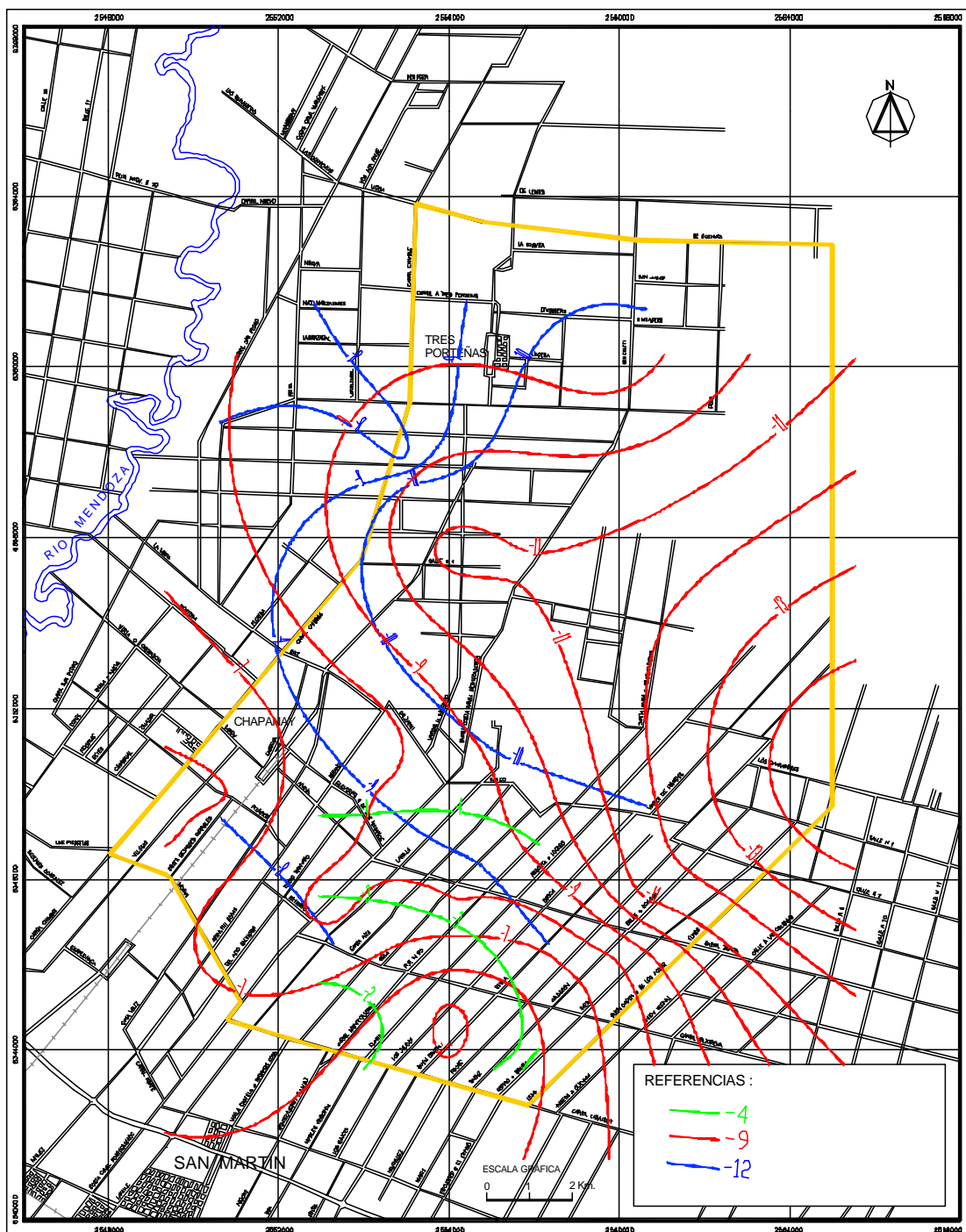


Figura 5. Curvas de igual profundidad de agua subterránea en invierno

Conclusiones

A partir de la evaluación de la composición química del agua subterránea de los tres niveles de explotación se dedujo la diferenciación salina entre estos no comprende cambios producidos por aportes de aguas de origen diferente y que se pasa de un estado de salinidad a otro de mayor salinidad por procesos de concentración donde los cambios en la concentración iónica se deben fundamentalmente a precipitación de sales que superan su producto de solubilidad.

Los procesos de concentración se originan en el agua subterránea de los mantos acuíferos mas superficiales que conforman el primer nivel de explotación por estar estas aguas sometidas a

extracción para riego, concentración por evaporación en superficie, lixiviación e infiltración al mismo nivel de explotación.

En el segundo nivel de explotación el fenómeno de concentración salina se debe a procesos de mezcla con aguas salinizadas del primer nivel. Estos se producen por cambios en la dinámica de fluidos inducidos por el sobre bombeo del segundo nivel y en menor medida por la comunicación vertical que ocurre en las perforaciones con roturas en la cañería de entubación y/o deficiencia en la aislación.

El proceso de salinización manifiesta un avance que compromete un área mayor con salinidades que van desde 2500 a 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En vastos sectores del área de estudio se producen diferencias notables de nivel del agua entre los tres niveles de explotación, con mayor amplitud en la época de máximo bombeo, de tal forma que aumenta la profundidad del agua a medida que aumenta la profundidad de explotación.

Estas diferencias de niveles están atenuadas en el período de invierno o menor bombeo.

SIMULACIÓN MATEMÁTICA CUALITATIVA

Objetivo

Contribuir al conocimiento del fenómeno de salinización de acuíferos y sugerir alternativas de acción que puedan atenuar el proceso en el futuro.

Metodología utilizada

Se estimó que la forma más competente de analizar el problema era la simulación matemática

Esta técnica permite tratar en breve tiempo numerosos valores de parámetros de acuíferos y de explotación y comparar los resultados.

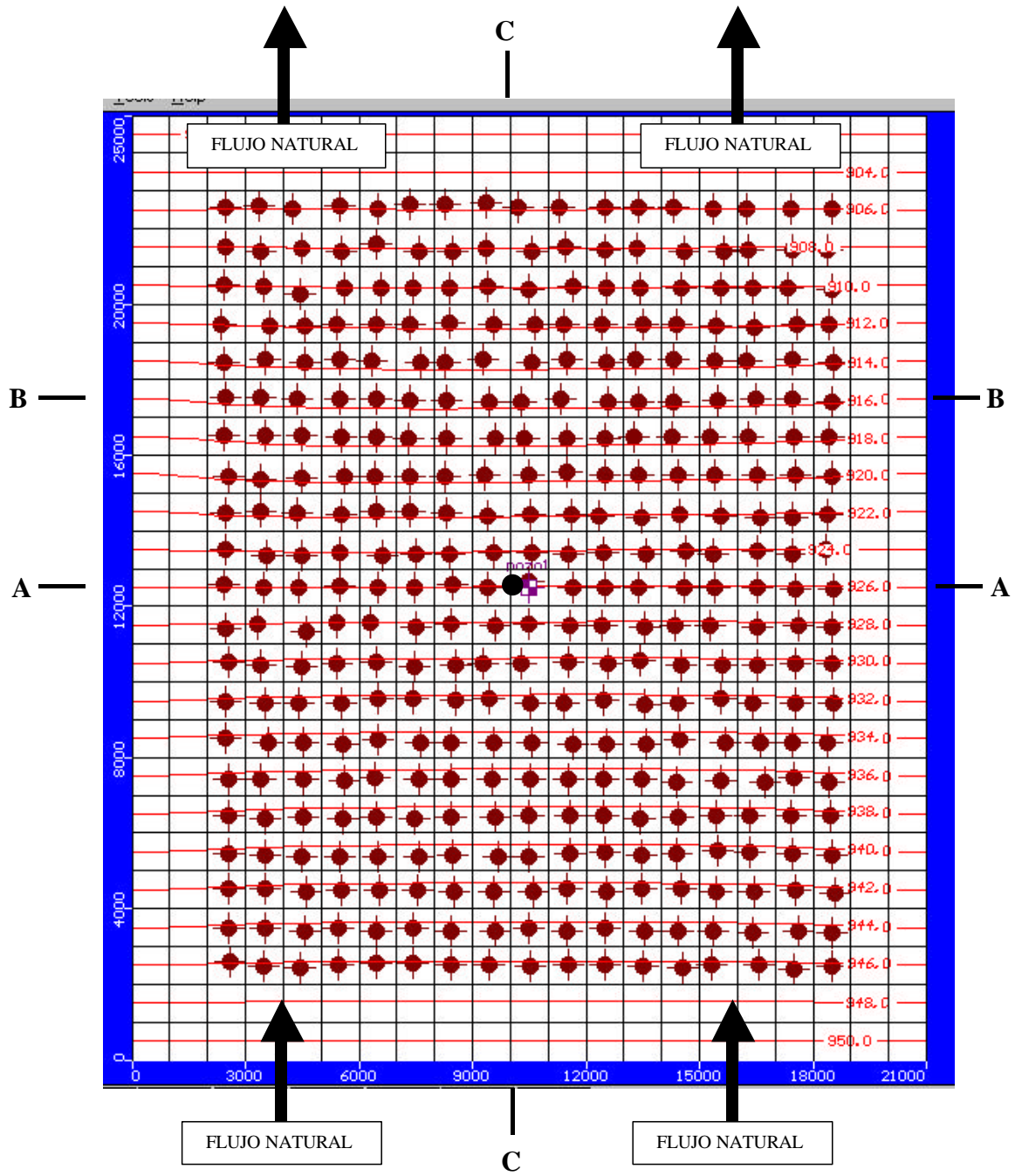
El modelo operado puede considerarse, por las simplificaciones adoptadas, una herramienta de análisis e investigación, más cualitativa que cuantitativa. Debe quedar claro que no es un modelo matemático de la zona afectada, sino de una imagen simplificada de la misma. Debido a esto, los resultados son, como se dijo, de carácter cualitativos, pero útiles por cuanto muestran las causas del fenómeno de salinización y qué puede esperarse de algunas acciones relacionadas con el uso del agua.

El modelo de flujo y transporte de masa es el conocido Modflow, en su versión para Windows. Es un producto de la Cía. Waterloo Hydrogeologic Inc. cuyo nombre es Visual Modflow. La versión utilizada es la 2.8.1.96

La subdivisión del área se hizo mediante celdas cuadradas de 1 Km de lado. La zona del modelo abarca 21 Km en sentido aproximadamente oeste- este y 25 Km en sentido norte sur. La orientación del modelo se debe a que la piezometría inicial indica flujo subterráneo sur- norte, predominantemente. Con esas dimensiones resulta un modelo de 525 celdas o polígonos, figura 6

Puesto que es importante analizar la salinidad en diferentes profundidades, se trazaron en el modelo 13 capas. La primera se extiende desde 0 a 60 m y las demás están distanciadas 20 m entre sí, figuras 7 y 8. Las celdas de las primeras filas y columnas son de borde ó nivel constante.

ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACIÓN DE ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE

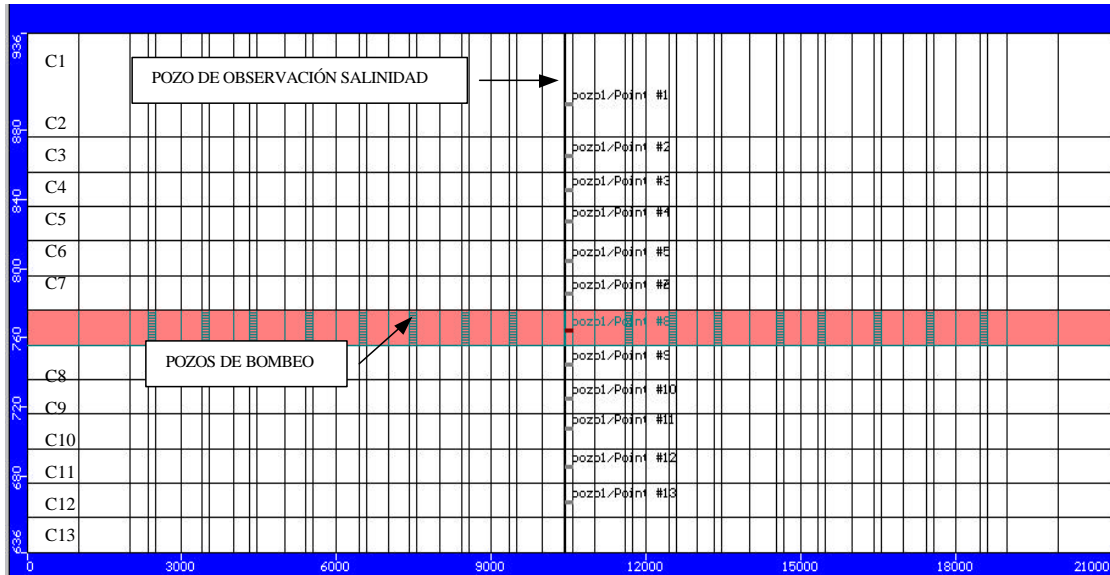


- POZO DE BOMBEO
- POZO DE OBSERVACIÓN DE LA SALINIDAD

Figura 6. Celdas del modelo - piezometria inicial- pozos de bombeo. Pozo de observación de la salinidad - ubicación de cortes

ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACION DE ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE

CORTE A-A



EXTENSION DE LAS CAPAS METROS

CAPA 1	00-60	CAPA 8	180-200
CAPA 2	60-80	CAPA 9	200-220
CAPA 3	80-100	CAPA 10	220-240
CAPA 4	100-120	CAPA 11	240-260
CAPA 5	120-140	CAPA 12	260-280
CAPA 6	140-160	CAPA 13	280-300
CAPA 7	160-180		

Figura 7. Capas del modelo - pozos de bombeo. Pozo y puntos para observación de la salinidad

ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACION DE ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE

CORTE C-C'

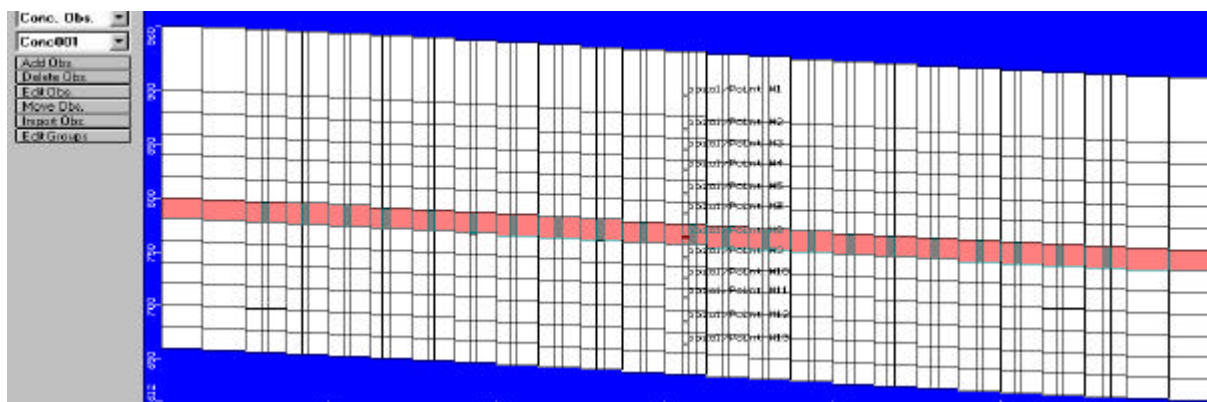


Figura 8. Capas del modelo - pozos de bombeo. Pozo y puntos para observación de la salinidad

Características del subsuelo y parámetros hidrogeológicos

Se analizaron 14 perfilajes eléctricos de pozos de la zona de estudio. Los resultados y criterios aplicados pueden consultarse en el informe específico.

Sobre la base de ese trabajo se puede afirmar que el subsuelo es una sucesión de capas más ó menos permeables, no apareciendo horizontes francamente arcillosos de espesores considerables ni de significativa extensión horizontal que formen una barrera eficaz contra el movimiento vertical del agua más cargada de sales.

Claros argumentos a favor de lo dicho son los numerosos estudios del CRA sobre la evolución del fenómeno a lo largo del tiempo, los que muestran un continuo avance de la salinidad hacia mayores profundidades. Además, todos los ensayos de bombeo realizados, cualquiera sea la profundidad del pozo, revelan circulación vertical de agua.

Los materiales más permeables son gravillas y arenas gruesas. Las capas menos permeables están constituidas por limos, arenas finas limosas, etc. En definitiva, las características sedimentológicas del subsuelo son congruentes con un ambiente sedimentario de llanura aluvial.

Al horizonte más superficial ingresan los excedentes de riego, agua salina que constituye una de las recargas importantes del subsuelo.

Las pérdidas por infiltración en la red de riego elevan la piezometría del horizonte superior y si bien esa recarga no es salina, favorece el desplazamiento vertical del agua.

Promediando los valores de Permeabilidad Horizontal que resultaron de 24 ensayos de bombeo realizados por el CRA en la zona de interés, se obtiene un valor de 36 m/día.

El análisis de correlación no muestra ninguna vinculación entre permeabilidad y profundidad.

Es de suponer que los pozos explotan acuíferos que fueron seleccionados atendiendo a su granulometría y espesor, razón por la cual el valor de 36 m/día debe representar la permeabilidad horizontal de capas de “permeabilidad alta”.

En un sistema de capas de diferente permeabilidad pero cada una isotrópica, la Permeabilidad Horizontal Equivalente (K_h) se calcula como:

$$K_h = \left(\sum_{i=1}^n e_i k_i \right) / e \quad (i=1 \text{ hasta número de capas})$$

e_i : Espesor de la capa cuya permeabilidad es K_i
 e : Espesor total, ó suma de los espesores de cada capa

Adoptando la simplificación de que existen sólo dos tipos de capas, las de baja y las de alta permeabilidad, la ecuación anterior resulta:

$$K_h = (e_b K_b + e_a K_a) / e = e_b K_b / e + e_a K_a / e \quad (1)$$

e_b : Suma de los espesores de las capas de baja permeabilidad K_b

e_a : Suma de los espesores de las capas de alta permeabilidad K_a

$e = e_b + e_a$: Espesor total ó extensión del intervalo

Obsérvese que e_b/e y e_a/e son las respectivas relaciones entre la suma de los espesores de cada tipo de capas y el espesor total.

Para obtener la Permeabilidad Vertical Equivalente (K_z) de un sistema de capas se aplica:
 $K_z = e / \left(\sum_{i=1}^n e_i / K_i \right)$ ($i=1$ hasta número de capas)

Si se considera un sistema de 2 capas, resulta:

$$K_z = e / (e_b / K_b + e_a / K_a) \quad (2)$$

El análisis de los 14 perfilajes eléctricos consistió en sumar los espesores de las capas de baja permeabilidad dentro de los intervalos 150-180 m; 180-200 m y 200-250 m de profundidad y calcular la relación entre tales sumas y la extensión de los intervalos indicados.

Se resumen seguidamente los valores obtenidos:

MATERIAL	RELACION	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	VALOR MEDIO
PERM. BAJA	e_b/e	0.15	0.45	0.29
PERM. ALTA	e_a/e	0.55	0.85	0.71

Aplicando en las ecuaciones (1) y (2) los valores $K_a = 36$ m/día y $K_b = 0.13$ m/día (propio de limos, arenas finas limosas, arenas arcillosas) resultaron los asignados a todas las capas del modelo:

$$K_h = 25 \text{ m/día}$$

$$K_z = 0.5 \text{ m/día}$$

La primera capa del modelo se trata como acuífero libre con un Coeficiente de Almacenamiento (S) del 10 %. Para las demás, por estar siempre saturadas, (S) es $4 \cdot 10^{-4}$.

Cultivos, bombeo y recarga

Según el censo e cultivos realizado por el CRA, en la zona de interés se cultivan 12451.9 has, La estructura del área cultivada es la siguiente:

Superficie cultivada (ha)

CULTIVO	VID	FRUTALES	OLIVOS	CHACRA	FORRAJE	TOTAL
SUPERFICE	10013.1	1895.1	75.75	295.0	172.95	12451.9
PORCENTAJE	80.4	15.2	0.6	2.4	1.4	100.0

Para calcular la demanda de agua es necesario fijar el consumo por los cultivos ó evapotranspiración, la eficiencia de aplicación del agua y la pérdida en la red de riego.

En relación con la evapotranspiración, el CRA sugirió los siguientes valores:

Evapotranspiración (m³/ha/año)

VID	FRUTALES	OLIVOS	CHACRA	FORRAJE
6920	9280	9280	6450	12930

Considerando el porcentaje de cada cultivo, integrando frutales con olivos y aplicando los valores de la tabla anterior, la evapotranspiración de 1 ha cultivada resulta 7366 m³/año.

Con el fin de calcular la demanda con cierto exceso, no se considera a la lluvia como agua útil, ó lo que es lo mismo, se la considera nula.

En cuanto a la eficiencia de aplicación ó de riego y atendiendo a las características marcadamente arenosas de los suelos, el CRA la estima en un 60 %.

Las pérdidas por infiltración en la red de riego, canales no impermeabilizados e hijuelas, son, según estudios realizados, importantes. Se la valora en un 40 % del agua que ingresa por los canales principales ó matrices. Esto significa que si se entrega a la red de riego un cierto caudal ó volumen, a la parcela llega sólo el 60% de esa cantidad.

Tal magnitud de pérdidas deriva de la elevada infiltración en los terrenos arenosos del sector.

La cantidad de agua requerida en la parcela es, entonces:

$$\text{Evapotranspiración} / 0.6 = 7366 / 0.6 = 12277 \text{ m}^3/\text{ha/año} \quad (3)$$

Para lograr ese volumen en la parcela, debería contarse en la cabecera de la red de riego con:

$$\text{Evapotranspiración} / 0.6 \cdot 0.6 = 7366 / 0.36 = 20461 \text{ m}^3/\text{ha/año} \quad (4)$$

El último volumen llama la atención por su magnitud, pero parece razonable si se tiene en cuenta que en el periodo Julio 2002-Junio 2003 los canales Montecaseros y Gaglignana, según información del DGI, derramaron dentro de la zona unos 220 hm³. Ese año fue de abundancia hídrica por lo que cabe suponer que el bombeo para complementar el riego fue mínimo.

No toda la superficie cultivada goza del derecho de riego; no toda recibe agua de la red. Los datos disponibles sobre esta cuestión son los siguientes:

Superficie cultivada con derecho de riego: 9813.85 has
Superficie cultivada sin derecho de riego: 2638.05 has

En el modelo la superficie cultivada con derecho de riego se distribuye uniformemente en 281 celdas, resultando 34.92 has en cada una, figura 9.

La superficie sin derecho de agua superficial se distribuye en 76 celdas, obteniéndose 34.71 has en cada polígono, figura 10.

La ubicación de las celdas con y sin derecho de riego es un tanto arbitraria. Sin embargo, teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo, el cambio de ubicación de las celdas no afecta significativamente los resultados.

Se considera que en el sector sin derecho de riego se bombea por cada hectárea cultivada el volumen anual indicado en (3)

La extracción de agua subterránea donde hay derecho de riego dependerá de la cantidad de agua superficial disponible.

En la encuesta realizada por el CRA algunos productores expresaron que en años “pobres de agua” el agua superficial sólo alcanza para regar la mitad de la superficie cultivada. En este caso, para 1 ha cultivada se tienen los siguientes valores:

Bombeo = Evapotranspiración * 0.5 / 0.6 = 7366 * 0.5 / 0.6 = 6138 m³/año
Agua superficial = Evapotranspiración * 0.5 / 0.6 * 0.6 = 7366 * 0.5 / 0.36 = 10230 m³/año
Cantidad total de agua para regar 1 ha = 16368 m³/año

La recarga se calcula siempre como diferencia entre el agua entregada y la evapotranspiración:

Recarga en la zona con bombeo exclusivo = 12277 - 7366 = 4911 m³/ha/año

Recarga en la zona con 50 % agua superficial y 50% bombeo = 16368 - 7366 = 9002 m³/ha/año

Los valores precedentes, sobre todo el segundo, son importantes.

Considerando ahora toda la superficie cultivada, se obtiene:

Superficie sin derecho de riego:

Bombeo = 12277 m³/ha/año * 2638 ha = 32.39 hm³/año
Recarga = 4911 m³/ha/año * 2638 ha = 12.95 hm³/año

Superficie con derecho de riego; 50 % de agua superficial y 50 % de subterránea:

Bombeo = 6138 m³/ha/año * 9813.85 ha = 60.24 hm³/año (5)

Agua superficial = 10230 m³/ha/año * 9813.85 ha = 100.39 hm³/año

Recarga = 9002 m³/ha/año * 9813.85 ha = 88.34 hm³/año (6)

Toda el área:

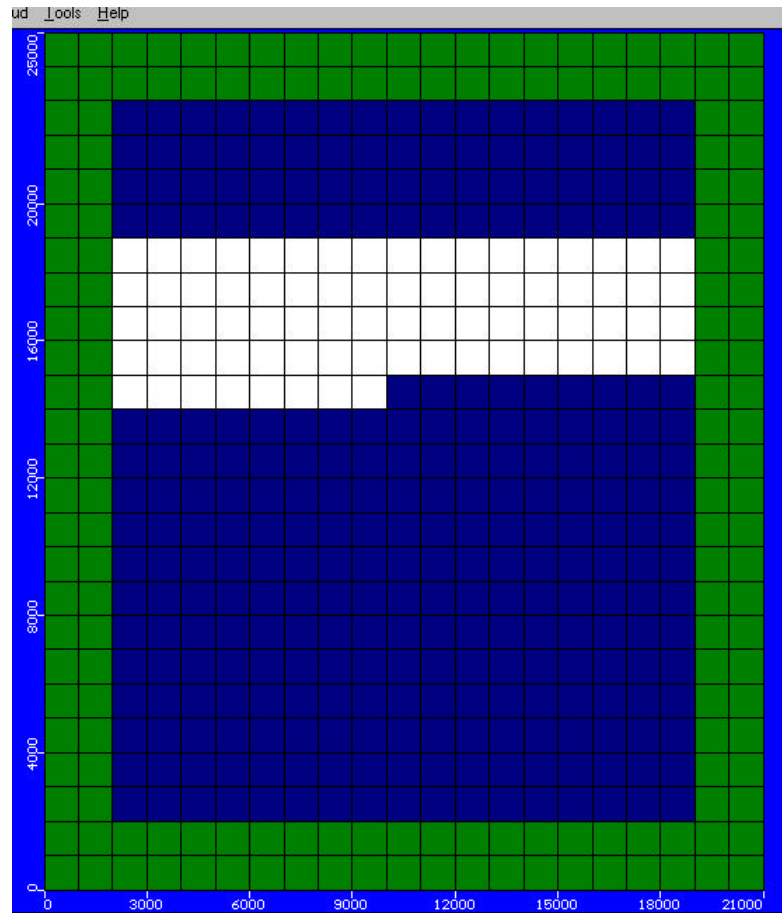
Demanda de agua = 193.02 hm³/año

Agua superficial = 100.39 hm³/año

Bombeo = 92.63 hm³/año

Recarga = 101.29 hm³/año

ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACION DE ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE



- RIEGO CON AGUA SUBTERRANEA
- RIEGO CON AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA

Figura 9. Zona de riego con agua subterránea. Zona de riego con agua superficial y subterránea

El bombeo calculado teóricamente es $12277 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$. Para precisar más este valor, se analizaron datos de consumo de energía aportados por la Cooperativa Eléctrica de San Martín.

Esa información se refiere a pozos en propiedades que carecen de derecho de riego, ó sea que satisfacen sus demandas hídricas con bombeo solamente.

Conociendo el consumo mensual de energía eléctrica, el caudal del pozo y la superficie cultivada, puede estimarse el volumen vertido a la unidad de superficie con cultivos.

Los datos pueden ser representados mediante una función estadística de Weibull.

La media de los 31 valores de la muestra es $14076 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ y el desvío estándar $9051 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$, el que se considera demasiado grande para lo que se analiza. En la mitad de los casos se regaría con $12000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ó menos. En la otra mitad se supera ese valor.

Si bien la media es aceptable y ser aplicable la distribución de Weibull, resultan un tanto inadmisibles valores tan bajos como $4000 \text{ m}^3/\text{ha/año}$ y tan altos como $28000 \text{ m}^3/\text{ha/año}$ ó más. De cualquier manera, esta es una buena metodología para el cálculo del agua aplicada y es recomendable desarrollarla.

Para obtener el bombeo y la recarga en cada celda del modelo se aplica el criterio expuesto más arriba, pero teniendo en cuenta la cantidad de hectáreas que contiene cada celda.

Operación del modelo

La primera alternativa tratada supone que el área con derecho de riego satisface su demanda hídrica con agua superficial y subterránea en partes iguales.

Esta alternativa es interesante por cuanto debe representar lo que sucede en un año hidrológico medio y sirve para comparar otras variantes.

La salinidad de la primera capa del modelo, aquella comprendida entre 0.0 y 60 m de profundidad, y la de la recarga se fijaron en 4000 mg/litro . La salinidad inicial de las demás capas se estableció en 1500 mg/litro

El tiempo de simulación es 20 años, extendido en algunos casos hasta 40 años. Cada año se divide en 2 semestres para obtener curvas de altura de agua y salinidad más continuas.

En todas las alternativas, el bombeo se localiza en la capa 7, la ubicada entre 160 y 180 m de profundidad, fondo del 2º nivel de explotación definido por el CRA. Todos los años tienen la misma recarga y el mismo bombeo

Para observar la salinidad a lo largo del tiempo de simulación y en cada capa del modelo, el software permite ubicar pozos de observación. En el presente caso se ha ubicado un solo pozo, en la parte central del modelo, (figuras 6; 7 y 8) el que “registra” la salinidad de cada capa en cada subperíodo semestral de simulación. Mayor cantidad de pozos de observación de salinidad complica la presentación, además, mostrarán el mismo fenómeno que el único utilizado.

Las curvas equipotenciales y vectores de flujo para 1 y 20 años de simulación en un corte normal al flujo natural que atraviesa la zona sin derecho de riego, indican neto flujo vertical descendente y ascendente, debido a la recarga y el mayor bombeo.

En un corte también normal al flujo pero por la zona con derecho de riego se observa que al ser el caudal de cada pozo de bombeo la mitad, del que extrae uno de la zona sin derecho, el flujo se muestra completamente descendente.

En la zona con derecho de riego y en la alternativa que se comenta, la recarga en cada celda es mayor que el bombeo, como se aprecia comparando (5) con (6)

Los vectores de flujo parecen indicar que sale agua por la base de la capa 13, ó límite inferior del modelo, pero no es así ya que los vectores son una proyección sobre el plano del corte. En realidad, el flujo es descendente y se aleja del papel y su proyección sobre el plano del corte es vertical y hacia abajo. La figura 10 aclara la cuestión.

Las figuras 10, 11 y 12 muestran la salinidad y los vectores de velocidad en el corte (C-C), paralelo al flujo natural, para los tiempos de simulación de 1, 20 y 40 años respectivamente. Comparándolas puede observarse un ligero efecto “barrido” del flujo natural, lo que genera en el subsuelo la clásica forma de “pluma” salina.

En las figuras indicadas se observa que la salinidad en las capas más profundas aumentó notablemente al cabo de 20 años de simulación, afectando ya algo a la zona de bombeo, capa 7.

ESTUDIO DEL PROCESO DE SALINIZACION DE ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE

CORTE C-C

1 AÑO DE SIMULACION

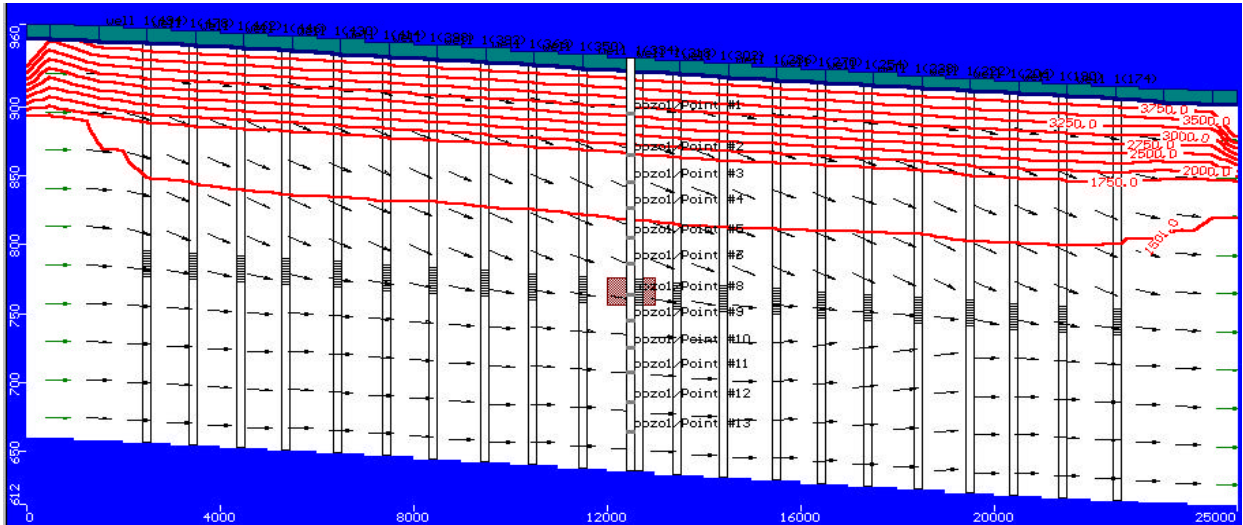


Fig. 10 Curvas de salinidad y vectores de flujo

ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE

CORTE C-C

20 AÑOS DE SIMULACIÓN

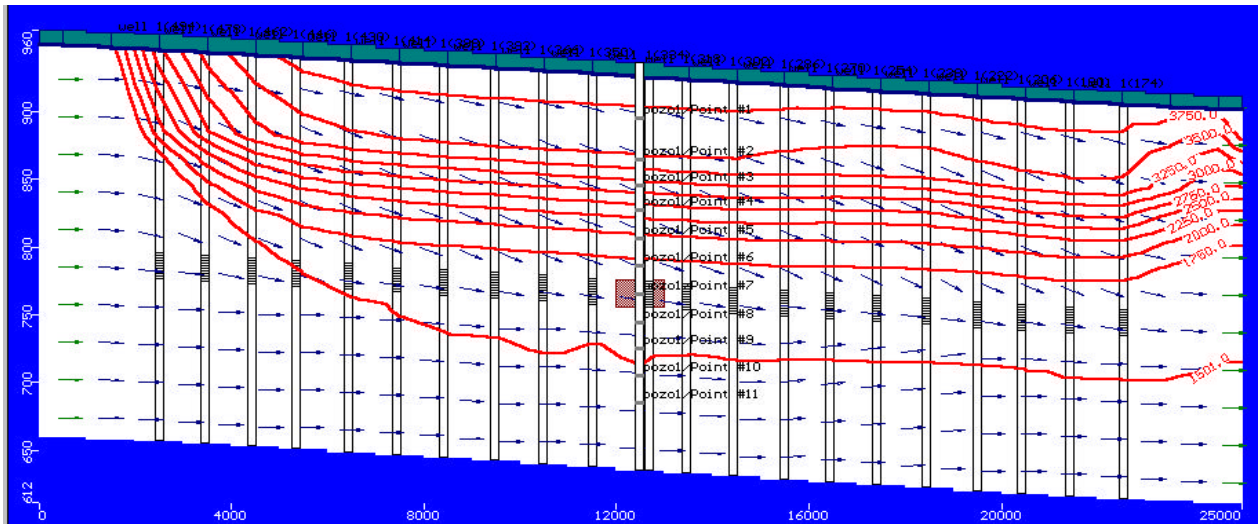


Figura 11. Curvas de salinidad y vectores de flujo

ESTUDIO DEL PROCESFIGURAO DE SALINIZACION DE ACUIFEROS EN LA ZONA ESTE DEL OASIS NORTE

CORTE C-C

40 AÑOS DE SIMULACIÓN

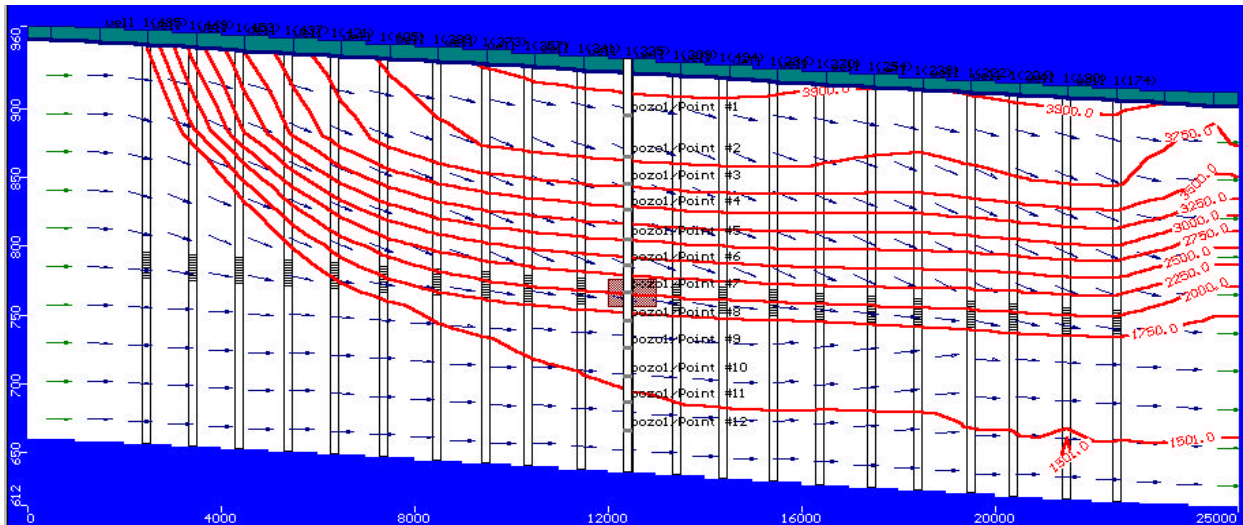


Figura 12. Curvas de salinidad y vectores de flujo

Las tres figuras con el corte longitudinal revelan algo interesante: observando el valor de 2000 mg/litro, por ejemplo, se aprecia que se desplaza desde el punto de observación 2 (80 m) hasta el punto 5 (140) m en unos 20 años y hasta el 7 (180 m) al cabo de 40 años.

El fenómeno de avance vertical de la salinización se muestra así más lento conforme la profundidad se hace mayor, bastante característico de un proceso de dilución. El “frente salino” con valor de 2000 mg/litro. Como se dijo, se desplaza más rápido en las capas menos profundas.

Es oportuno ahora estudiar cuán sensible es el modelo a la permeabilidad vertical.

La alternativa en cuanto a bombeo y recarga es la misma, pero se cambiaron los valores de la permeabilidad vertical de las capas (K_z)

El resultado se expone en el gráfico 6, en el cual puede verse que la salinidad prácticamente no avanza cuando la permeabilidad es (K_z) 0.001 m/día. Esta es permeabilidad vertical equivalente (K_z), calculada mediante la (2), la que permite ahora obtener el valor del parámetro de las capas de “permeabilidad baja” (K_b) dentro del paquete sedimentario, el que resulta: 3.10^{-4} m/día ó $3.46.10^{-7}$ cm/seg, valor propio de arcillas.

Para mayores permeabilidades que la indicada y hasta 0.1 m/día, la salinización es mucho más marcada y superando este último valor el modelo se muestra prácticamente indiferente al parámetro. Recuérdese que la permeabilidad (K_z) utilizada en la simulación es 0.5 m/día.

En definitiva, para que no haya movimiento vertical de agua deberían existir capas de arcilla con buena extensión horizontal. No parece ser el presente caso

Otras variantes

Es interesante analizar qué podría esperarse de satisfacer con agua superficial la demanda hídrica de la zona con derecho de riego.

En ese caso la recarga aumentaría, por las pérdidas en la red, con respecto a la alternativa anterior (50%-50%) y el bombeo en toda la zona sería solo el del sector sin derecho de riego.

A modo de comparación se supone, en otra variante, lo contrario: que la superficie con derecho de riego no recibe agua superficial, sino que extrae toda agua subterránea para sus cultivos. Estas dos variantes extremas y la primera (50%-50%)

Debe aclararse que en todos los casos se considera que la eficiencia de aplicación (ζ) es 60 % y las pérdidas en la red de riego 40 %.

En realidad eso no es exactamente así ya que el porcentaje de pérdidas en la red de riego no es constante sino que disminuye con el caudal. Puede variar desde un 100 % cuando el caudal derivado a la red es muy pequeño hasta uno bastante menor en el caso de que el agua derivada colme la capacidad del sistema. .

La situación empeora cuando la recarga es máxima, o sea cuando toda el agua proviene de la red de riego. La recarga es máxima debido a las pérdidas de la red de riego supuestas, las que son nulas cuando se usa exclusivamente agua subterránea.

Pero como tales pérdidas no son proporcionales al agua entregada, la diferencia entre las alternativas puede ser aún menor.

Si bien incrementar la cantidad de agua superficial (mejor dicho, la cantidad entregada por la red de riego) no impedirá el fenómeno que nos ocupa, aliviaría a los usuarios cuyos pozos se inutilizaron por salinidad excesiva.

De dónde provendría tal incremento es cuestión que deberá estudiarse.

Finalmente se presenta el gráfico 8 con el resultado de mejorar el uso del agua. Se refiere también a la alternativa de referencia: 50% bombeo; 50 % agua superficial.

La eficiencia de aplicación se eleva en 10 % y 20 % y las pérdidas en la red se reducen, respectivamente, 10% y 20%. Resumiendo, los pares de valores aplicados son:

Eficiencia de aplicación %	60	66	72
Pérdidas en red de riego %	40	36	32

El gráfico 3 muestra que si fuese posible mejorar la eficiencia de aplicación y disminuir las pérdidas, el fenómeno sería menos intenso.

No caben dudas de que el movimiento vertical del agua se acelera con la magnitud del bombeo, aún sin considerar recarga. También, que se genera flujo vertical por causa de la recarga, aún haciendo el bombeo nulo.

Cuando están presentes ambas situaciones, bombeo y recarga, sus efectos prácticamente se suman. En consecuencia, para hacer menos intenso el fenómeno debería disminuirse la magnitud de ambos, lo que se conseguiría elevando la eficiencia general en el uso del agua, si ello fuese posible, lógicamente.

Cabe repetir que el modelo tiene simplificaciones importantes, como la de admitir una densidad de perforaciones constante de 1 pozo/Km². Esto no es así, como puede apreciarse a simple vista en los mapas de la zona.

En los sectores con alta densidad de pozos se generan fuertes depresiones que incrementan el gradiente vertical y la velocidad del flujo descendente. Es muy posible, por ello, que en tales sectores se observe más rápida salinización que en otros con menor densidad.

Otra simplificación es que el modelo no considera el esquema real de depresiones de un pozo bombeando, es decir el cono de depresión. En el tipo de acuíferos tratados, el flujo vertical es más intenso en las cercanías del pozo, por la mayor depresión allí.

En definitiva y para concluir, se estima que el fenómeno presente continuará avanzando, probablemente a menos velocidad por efecto de la dilución y del barrido del flujo natural.

La salinidad del horizonte más bombeado, el 2º nivel de explotación, aumentará con el tiempo y llegará un momento en que cada usuario percibirá que la calidad del agua que bombea le causa más perjuicios que beneficios. Considerará entonces la conveniencia de construir un nuevo pozo, más profundo, a sabiendas de que este tendrá vida útil limitada, la que dependerá mucho de la profundidad de la nueva captación y de la calidad constructiva de la misma.

Debería habilitarse para la explotación el 3º nivel, dejando, a modo de barrera de protección, unos 50 m de espesor de sedimentos. O sea que las nuevas perforaciones deberán superar 250 m de profundidad.

En cuanto a la recuperación de los acuíferos afectados cabe decir que, a menos que se apliquen costosas y complicadas técnicas de inyección y bombeo, el único recurso disponible es el flujo natural, pero este sería efectivo si la causa de la salinización, cual es, en definitiva, la actividad agrícola, cesara. Por supuesto esto es impensable, pero admitiéndolo como hipótesis, la recuperación de los acuíferos llevará prolongado tiempo, quizás varias décadas.

Lo que ocurre en la zona con el agua subterránea se encuadra dentro de lo que se llama “minería del agua subterránea”, es decir explotable pero no renovable, al menos en calidad.

Pozos en mal estado

La investigación llevada a cabo por el CRA pone de manifiesto que el fenómeno de los pozos rotos ó corroídos alcanza magnitud de grado superlativo.

Se estima en esos estudios que el 50 % de las perforaciones se encuentran en mal estado.

La cañería corroída permite el ingreso de agua al pozo desde horizontes con elevada salinidad que se localizan a menor profundidad que los filtros. Esos horizontes tienen mayor altura piezométrica que el acuífero explotado.

El CRA ha desarrollado una interesante metodología para saber si el pozo está en buenas condiciones ó no, ó sea si el agua que extrae es la del acuífero cuya calidad se quiere conocer ó una mezcla que no la representa.

Se trata de los llamados “ensayos hidroquímicos seriados”, que consisten básicamente en medir la salinidad a intervalos de tiempo muy pequeños desde la puesta en marcha del pozo.

En los pozos rotos la curva de conductividad eléctrica en función del tiempo de extracción muestra un pico ó elevación, más ó menos importante, cuya duración es variable según el tiempo durante el cual el pozo estuvo previamente inactivo.

Pasado el pico de mayor salinidad, la conductividad eléctrica del agua se estabiliza en cierto valor, el que se observa también al comenzar la prueba.

En pozos sanos la salinidad es constante, es decir, independiente del tiempo de bombeo; son los aptos para extraer muestras del agua del acuífero.

En la mayoría de los ensayos se observa que el incremento de salinidad ocurre a los pocos segundos de poner en marcha el pozo, lo que sugiere que las roturas se ubican cerca de la entrada ó succión de la bomba.

El ensayo seriado permite también calcular el caudal de agua salada que ingresa al pozo por las roturas cuando está inactivo.

Los trabajos del CRA estiman que el caudal de agua salina que entra a los pozos rotos es, como promedio, casi $1 \text{ m}^3/\text{hora}/\text{pozo}$.

Si los pozos en malas condiciones son 400 y se suponen todos sin funcionar, el caudal que se desplaza hacia el acuífero es entonces de $400 \text{ m}^3/\text{hora}$ ó $166 \text{ l}/\text{seg}$.

De cualquier manera el caudal no es significativo debido a que no constituye una recarga continua, unos $3.5 \text{ hm}^3/\text{año}$, y a que es extraído durante el bombeo, muy superior en cantidad.

El caudal de agua que entra al pozo por las roturas depende de la diferencia de carga entre la pared externa e interna de las mismas. Es previsible en consecuencia, que ese caudal aumente cuando el pozo “deprima”, es decir cuando funcione.

Los resultados indican que el caudal de agua salada que se extrae durante el bombeo podría ser bastante importante; algunos valores son por cierto exagerados.

Para que el caudal salado sea de magnitud razonable, el que podría esperarse circule por agujeros de corrosión, la salinidad que ingresa debería ser bastante más elevada que la máxima medida en la prueba. Esto se considera lo más probable.

El caso del pozo 3439 es un buen ejemplo. Este ha penetrado hasta 307 m de profundidad, es decir bien adentro del 3° nivel de explotación, el de menor salinidad.

El caudal de agua salada que ingresa a este pozo, cuando está inactivo, es $0.53 \text{ m}^3/\text{h}$.

Admitiendo que la salinidad del acuífero sea $1500 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ y que el caudal anterior se mantenga durante el bombeo, la salinidad estabilizada de $1930 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ se lograría si la del agua que ingresa por las roturas fuese $182000 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$; sin duda excesiva.

Para disminuir el último valor hasta uno más propio de aguas freáticas, digamos $20000 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$, la alternativa admisible es aumentar el caudal de las roturas, parámetro desconocido cuando el pozo funciona.

Si ese caudal se incrementa a $5 \text{ m}^3/\text{h}$, la salinidad resultante es la estabilizada. Como se dijo, es muy probable, sino seguro, que el caudal de agua salada cuando el pozo funciona sea mucho mayor que cuando no lo hace.

La consecuencia de las roturas de pozos es degradar más rápidamente suelos y cultivos y aumentar la salinidad del agua de retorno ó excedentes de riego.

Si un pozo roto, por otra parte, inyecta $1 \text{ m}^3/\text{hora}$ de agua salada, se requieren 6 horas para desplazar una columna de agua contenida en un caño de 8” de 200 m de longitud.

Puesto que en épocas de mínimo ó casi nulo bombeo el pozo debe estar inactivo varios días, es seguro que el agua salada inyectada llega al acuífero y se introduce en él.

Un pozo inactivo durante 30 días envía al acuífero unos 700 m³ de agua salada, los que podrán ser extraídos en pocas horas de bombeo.

El efecto de la salinización de acuíferos por roturas puede agravarse cuando hay pozos que inyectan (no funcionan ó fueron abandonados) y otros cercanos que bombean.

Un pozo que extraiga 150 m³/hora produce en el acuífero una depresión de unos 2 m a distancia de 200 m. Si un pozo roto se encuentra a tal distancia, el caudal salino que inyecta aumentará debido a la mayor diferencia de carga generada por el que bombea. El agua inyectada se desplazará hacia el pozo de bombeo.

Inyección y bombeo generan un complejo esquema piezométrico, más aún en zonas con alta densidad de perforaciones, que contribuye a deteriorar el agua del acuífero.

Puesto que la corrosión y sus efectos aumentan con el tiempo, pudiendo terminar con el colapso del pozo, es de esperar que la salinidad del agua bombeada incremente progresivamente y pueda tornarse no apta para riego.

Conclusiones

- En el segundo nivel de explotación el fenómeno de concentración salina se debe a procesos de mezcla con aguas salinizadas del primer nivel. Estos se producen por cambios en la dinámica de fluidos inducidos por la recarga vertical del primer nivel debido a pérdidas de conducción en canales y predios agrícolas, el sobrebombeo del segundo nivel.
- En menor medida influye la comunicación vertical que ocurre en las perforaciones con roturas en la cañería de entubación y/o deficiencia en la aislación. La cantidad de pozos con roturas es importante y se debe esperar que aumente.
- El proceso de salinización manifiesta un avance que compromete un área mayor con salinidades que actualmente van desde 2500 a 4500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- En vastos sectores del área de estudio se producen diferencias positivas en el nivel del agua entre los tres niveles de explotación, con mayor amplitud en la época de máximo bombeo.
- La salinización de acuíferos por movimiento vertical de aguas salinas es irreversible y continuará, con más ó menos intensidad, durante el transcurso del tiempo.
- Debido a que el movimiento vertical del agua y los pozos corroídos deterioran simultáneamente la calidad del agua subterránea, la producción agrícola puede ser afectada.
- La situación presente y sus perspectivas futuras, en caso de no cambiar radicalmente, configuran un caso de “minería del recurso hídrico subterráneo”.

Recomendaciones

- Estudiar la posibilidad de disponer de fuentes alternativas de agua que permitan incrementar la cantidad entregada por la red de riego. En este sentido, el bombeo de agua subterránea mediante baterías de pozos, instaladas en lugares adecuados, es una alternativa interesante.
- Definir si es posible que la eficiencia en el uso general del agua, que incluye la de aplicación y la de la red de riego, puede ser mejorada.
- Habilitar para la construcción de nuevos pozos el 3° nivel de explotación. Dejar, a modo de barrera de protección, unos 50 m de espesor de sedimentos por lo que los filtros deberán ubicarse debajo de los 250 m.
- Mantener el **actual** criterio de cegar pozos que dejaron de usarse por el elevado tenor salino del agua y el de aplicar, rigurosamente, la reglamentación referida a la construcción de pozos (materiales, filtros, cementación, perfilajes eléctricos, ensayos de bombeo, etc.) y al distanciamiento mínimo a respetar entre obras de captación.
- Debe proveerse inspección oficial de todas las tareas y de los materiales utilizados en cualquier perforación nueva.
- Recomendar a los usuarios las técnicas de investigación de las roturas de pozos con el fin de definir si es posible la reparación de los mismos. También las referidas a comprobar la efectividad de las reparaciones realizadas.
- Utilizar los registros de consumo de energía para calcular el bombeo sobre bases reales.
- Aplicar como cuestión de rutina los ensayos hidroquímicos seriados, prolongando el periodo de medición de salinidad a varias horas.
- Construir una red de freatómetros para obtener información hidrológica e hidroquímica de las capas acuíferas mas superficiales.
- Realizar muestreos hidroquímicos y mediciones hidrológicas periódicas para “seguir” de cerca la evolución del fenómeno en la zona.
- Seleccionar pozos testigos para ser muestreados con mayor frecuencia.
- Operar un modelo matemático de flujo y transporte de masa con información real de la zona (distribución de los cultivos en el área, densidad de pozos, piezometría, etc.) y simular alternativas de uso conjunto de agua superficial y subterránea propuestas por el DGI y el CRA.

BIBLIOGRAFIA

- Alvarez, Amílcar** (1984) *“Evaluación Hidroquímica del Recurso Hídrico de la Zona Norte de la provincia de Mendoza”*. P- 271 – CRAS.
- Alvarez, Amílcar** (1993) *“Estudio de Contaminación del Agua Subterránea, Salinización de Acuíferos y contenido de Arsénico, Fluor y Nitrato. Zona Norte, provincia de Mendoza”*. DI – 214 –CRAS.
- Alvarez, Amílcar; Jorge Villalba** (1996) *“Estudio de Salinización de Acuíferos Control del Estado de Perforaciones, Departamento de Junín. Zona Norte - Provincia de Mendoza”*. DI-266 - CRAS.
- Alvarez, Amílcar; Jorge Villalba** (2003) *“Control de la Salinidad del Agua Subterránea en la Zona Norte – Provincia de Mendoza”*. IT-29 – CRA.

Benítez, Alberto (1972) *Captación de Aguas Subterráneas*. Ediciones DOSSAT, S.A. Plaza de Santa Ana, 9. Madrid – 12. 1972.

Custodio, Emilio, Llamas, Manuel Ramón (1976) *Hidrología Subterránea*. Directores de edición. Ediciones Omega, S.A. Casanova, 220 – Barcelona - 11. 1976.

Department of Technical Cooperation for Development (1989). Division of Natural Resources Energy. Water Resources Branch. United Nations. Ground Water Software. Version 1.0.

Martinis, Nicolás (2003) “ *Hidrología Subterránea Zona Este del Oasis Norte, Área de Restricción Zona Este – Provincia de Mendoza*”. IT-31-CRA.

Méndez, Eduardo (1988) “*Estado Actual de las Perforaciones de la Zona Norte. Depto. San Martín. Provincia de Mendoza*”. DI - 122 - CRAS.