



GUÍA SOBRE SALINIZACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ESTE MENDOCINO



Armando Llop - Amílcar Alvarez

Mendoza, 2002

Indice

1. Introducción	4
2. Evolución del uso del agua subterránea	4
3. Descripción del sistema hídrico de la cuenca norte	5
a) Estructura de un Sistema Completo	6
4. Características del agua subterránea de la cuenca norte	9
5. Ciclo de sales en la cuenca	12
a) Salinidad del agua que ingresa en la cuenca	12
b) Salinidad del agua subterránea	13
c) Como se acumulan las sales en el nivel freático	15
d) Cómo se salinizan los acuíferos confinados	16
e) Ensayos para identificar pozos con problemas	17
6. La tragedia de la finca de don Pedro 1: La mecánica del proceso de salinización	19
7. Efecto de la salinidad en los cultivos	22
a) Salinidad del agua de riego	23
b) Salinidad del agua del suelo	25
c) Efectos de la salinidad del suelo en la rentabilidad del productor	27
8. La tragedia de la finca de don Pedro 2: Pérdida de rentabilidad por salinización	27
9. Don Pedro y la Tragedia de los Comunes	30
10. Estructura y funcionamiento del agua subterránea en el área crítica	31
a) El área crítica seleccionada	32
b) Un modelo para describir el proceso de salinización	33
i) Descripción del modelo	34
ii) Formalización del modelo	35
iii) Resultados	37
11. Síntesis final de los impactos de la salinización	40
12. Referencias y Bibliografía	42
ANEXO I	44
¿Cuánta salinización por los pozos y cuánta por el semiconfinamiento?	44
Introducción	44
Presentación conceptual del método de cálculo	44
Conclusiones	45

ANEXO II 47
Ley de aguas subterráneas N° 4035, de 1974 47
ANEXO III 49
Aspectos centrales del reglamento técnico de perforaciones y registro de directores técnicos y empresas constructoras de perforaciones..... 49

1. Introducción

La presente Guía sobre salinización del agua subterránea en el este mendocino trata de incorporar de manera sencilla y accesible en un solo volumen todo lo que se conoce acerca de este problema. Está particularmente dirigido a quienes están involucrados directa o indirectamente en el manejo del agua subterránea en los departamentos de San Martín, Rivadavia, Junín, Santa Rosa y La Paz, ya que ante el actual proceso de descentralización impulsado por el Departamento General de Irrigación las Inspecciones de Cauce deben asumir la doble tarea de manejar el crítico problema de salinización de acuíferos y lograr un manejo integral de los recursos hídricos. Esta guía describe:

- El sistema hídrico en la cuenca e incursiona en el ciclo de sales.
- Los procesos por los que se saliniza el agua subterránea y los suelos, usando el ejemplo sencillo de la finca de don Pedro.
- Si el efecto de la salinidad del agua en la productividad de los cultivos.
- La manera en que afecta el resultado económico de la empresa agrícola.
- Un modelo muy sencillo para ayudar en la toma de decisiones.
- Las medidas que deberían tomarse para controlar este fenómeno.

El material que aquí se presenta es el utilizado por los autores de esta Guía en los encuentros mantenidos con agricultores y funcionarios de Inspecciones de Cauce del río Tunuyán Inferior en el año 2001.

2. Evolución del uso del agua subterránea

El agua subterránea comienza a utilizarse en Mendoza de manera relevante a partir de la década de los '50. Allí comienza un paulatino aumento en el número de bombas de agua subterránea hasta el período 1967-72, en el cual se estableció casi el 50% de los 19.000 pozos hoy existentes en la provincia. Esto se debió a la conjunción de tres factores: altos precios e ingresos en el sector agrícola, fuertes degravaciones impositivas y el ciclo hidrológico seco más severo del siglo. A partir de esta histórica escalada, el crecimiento de pozos continuó más moderadamente, ya afectado por las sucesivas crisis vitivinícolas que comenzaron a manifestarse a principios de los '70. Durante la segunda mitad

de la última década se observó un proceso de intensificación del uso del agua subterránea debido a que las nuevas inversiones hacen un uso intensivo de este recurso.

Hasta principio de los '90 y a pesar de ser un bien público, al agua subterránea se la trató como si fuese un bien privado. Esto es, cualquier individuo podía realizar perforaciones donde le resultara conveniente con solo solicitar un permiso y posterior concesión al Departamento General de Irrigación (DGI). En la práctica no existieron limitaciones al otorgamiento de las mismas, a pesar que la Ley de Aguas Subterráneas N° 4035 de 1974 le asigna al DGI el poder de policía total sobre el agua subterránea. Esta situación hizo que importantes áreas sin derechos de agua superficial se regaran masivamente solo con agua subterránea. Esta situación es particularmente importante en el este mendocino, particularmente en San Martín, donde se desencadenó un proceso de salinización del agua subterránea por sobreexplotación. Solo a principios de los '90 se comenzó a aplicar restricciones al desarrollo de nuevas perforaciones en esta área. Esto no ha sido suficiente para controlar el proceso de salinización, por lo que hay que hacer mucho más para dominarlo y asegurar la sustentabilidad de la región.

3. Descripción del sistema hídrico de la cuenca norte

La Figura 1 presenta un esquema del sistema hídrico de la cuenca norte de Mendoza donde se muestra una parte del relieve de la cuenca con un corte en profundidad. En la superficie puede observarse al oeste la presencia de montañas donde se acumulan las nieves que nutren los ríos Mendoza y Tunuyán. En el corte se ha representado la estructura del sistema subterráneo que va desde la superficie del suelo en la parte superior hasta el basamento cristalino impermeable formado por material del período terciario. Se supone que por debajo de este nivel no existen otras fuentes de agua subterránea.

Al iniciarse el período cuaternario, la superficie del suelo de la cuenca –constituida por material del terciario en ese momento– formaba una especie de gran cubeta. Conforme se formaron los plegamientos montañosos, los procesos de erosión fueron produciendo material de distinta textura, arrastrándolo río abajo y depositándolo al reducirse la pendiente. Es así como esta gran cubeta formada en el Terciario se ha ido relleno con el material de arrastre y sedimentos. El material más grueso se depositó en las zonas de mayor pendiente hacia la desembocadura del río al pie de la montaña y los sedimentos de menor textura hacia la llanura.

a) Estructura de un Sistema Completo

En la Figura 1 se intenta representar la estructura de un sistema completo con sus distintos componentes. En la parte superior de este esquema, con la forma de un gran paraguas que intenta cubrir todo el ámbito administrado, se encuentra la Constitución Nacional (o provincial, o la que corresponda al sistema seleccionado). Por debajo de este amplio paraguas, se encuentran los distintos estratos que representa la estructura de una comunidad organizada en función de los tres poderes tradicionales del Estado, lo que determina el funcionamiento del sistema socioeconómico, sustentado por el sub-sistema físico químico y ecológico.

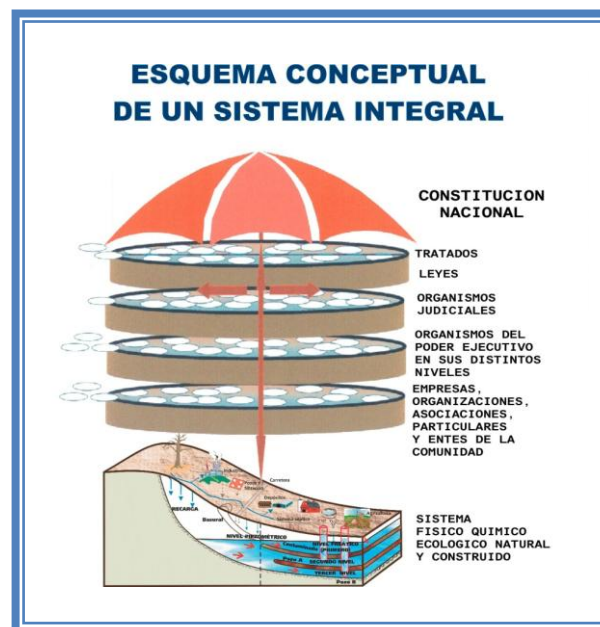


Figura 1. El sistema hidro-ambiental

Por debajo de la Constitución, en primer lugar se encuentra un estrato conformado por el sistema legal, que son básicamente los tratados y las leyes. En este estrato, las lenticelas que aparecen distribuidas de manera aleatoria y con eventuales superposiciones, representan distintos cuerpos legales o tratados con injerencia en la gestión del ambiente y los recursos hídricos. En realidad, estas lenticelas no son independientes una da la otra, sino que están interconectadas a manera de una red. Obsérvese que algunas leyes pueden estar fuera del paraguas, lo que indica su inconstitucionalidad.

En el próximo estrato aparece la estructura del poder judicial, donde cada elipse representa distintos juzgados relacionados directa o indirectamente con aspectos relativos a la resolución de problemas de asignación de recursos, degradación de los mismos, etc., que corresponden a cuencas o a sistemas hídricos.

El siguiente estrato representa los organismos del poder ejecutivo, ámbito del sector público que, estando bajo el andamiaje legal y normativo de los estratos superiores, son los encargados de ejecutar las distintas acciones en los distintos componentes de una cuenca o sistema.

Finalmente, el cuarto estrato muestra todos aquellos organismos, entes o personas jurídicas de naturaleza privada que actúan en la cuenca o ámbito bajo análisis, que son los operadores del sistema económico social. Se encuentran acá incluidas todas las organizaciones civiles de distinta naturaleza (ONG's ambientalistas, asociaciones de usuarios, etc.) Las Inspecciones de Cauce son, como afirma-

ba el Dr. Guillermo Cano, antes de naturaleza semipública, por lo que corresponde colocarlas en una interfase entre estos dos últimos estratos.

En todos los estratos pueden verse algunas elipses que escapan al área comprendida bajo el gran paraguas superior, lo que indican que existen en todos los estratos acciones o actividades que escapan a la constitucionalidad, no obstante debe reconocerse su existencia para incorporarlas dentro del ámbito administrado.

Por último, reconocemos en la parte inferior el clásico diseño de una cuenca hídrica, en la que tiene presencia el ciclo hidrológico, el sistema de agua superficial y subterráneo, y donde tienen lugar los distintos usos del agua, donde el hombre desarrolla sus acciones mediante obras de infraestructura, normas de comportamiento, etc. Aquí el agua se asigna a distintos fines, ocurre todo tipo de interacciones, se producen externalidades, conflictos, etc. El agua genera bienestar y riqueza por un lado, pero también está sujeta a producir situaciones de inequidad social y de falta de sustentabilidad según se administre.

En el heterogéneo sistema graficado en la Figura 1, resulta claro que lo que sucede en el ámbito hidro-socio- ambiental está determinado por las acciones determinadas por la comunidad en los estratos sociales. Los procesos de salinización que se tratan en este trabajo, son precisamente consecuencia de una inadecuada gestión.

Como puede apreciarse, este sistema se caracteriza por su alta complejidad, el que prima la integridad que comprende todas las disciplinas, los distintos sectores, las múltiples instituciones, etc.

Las Figuras 2 y 3 muestran la evolución de la cuenca durante el proceso de ocupación del espacio y el desarrollo económico. En la Figura 2 se presenta la cuenca norte en su estado natural donde el río escurre libremente y el ciclo hidrológico funciona en condiciones de equilibrio estable. La Figura 3 muestra la cuenca con un avanzado estado de intervención. Si no se hacen bien las cosas (normas no apropiadas o no aplicadas correctamente) y se deja que el hombre, persiguiendo sus genuinos intereses, haga un uso inadecuado del agua, las condiciones del sistema hídrico no serán sustentables. Esto puede llegar a retrotraer el desarrollo económico, deteriorando la productividad del sistema y la calidad de vida.

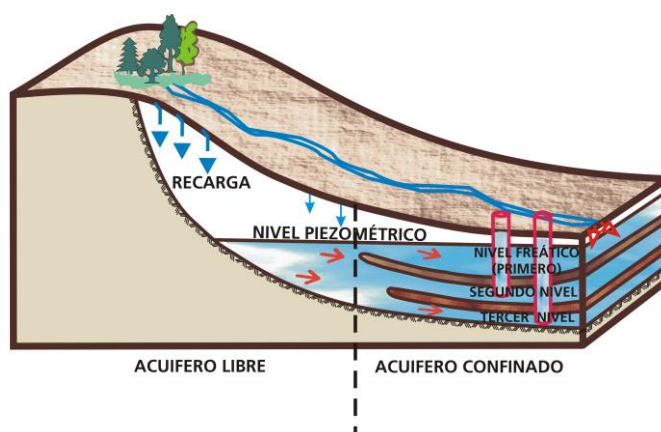


Figura 2. La cuenca norte en su estado natural.

La estructura en el corte de las Figuras 1 a 3, muestra que en su primera porción el acuífero es libre y está constituido por material muy grueso y poroso, tal como cantos rodados y arenas gruesas. Se denomina acuífero libre porque todo su perfil está conformado por material grueso y en él el agua puede acumularse hasta llegar a la superficie del suelo sin límite o confín alguno. Al desplazarnos hacia el este, donde se han depositado materiales más finos, se pueden ver estratos o capas de distinta textura. Esta segunda porción del sistema se llama acuífero confinado, formado en realidad por tres estratos de textura gruesa. Cada estrato conforma un nivel acuífero que se conoce, de arriba hacia abajo, con el nombre de freático, segundo nivel y tercer nivel de explotación. El freático es libre y los otros dos son confinados. Están separados o confinados por capas de material fino -arcillas y limos- que son poco permeables. Por ello se los llama semiconfinamientos, o también acuitardos, ya que el agua que por ellos pasa tarda en hacerlo por su baja permeabilidad. Esto quiere decir que si son distintas las presiones entre los distintos niveles, el agua puede lentamente desplazarse del acuífero de mayor presión al de menor presión a través del semiconfinamiento.



Figura 3. La cuenca norte intervenida por el hombre.

La Figura 2 muestra en la superficie una cuenca muy poco intervenida que desde el punto de vista hidrogeológico, representa lo que ocurría a principios del siglo pasado. La Figura 3 muestra los avances que se han producido con la intervención del hombre en la cuenca. Se destacan en esta figura los problemas de intervención humana y ocupación del espacio, que producen distintos tipos de contaminación, explotación de agua subterránea hacia el tercer nivel y la complejización general del sistema.

El ciclo hidrológico en las Figuras 1 a 3 es el mismo. Las precipitaciones níveas se acumulan en la montaña y el derretimiento de nieve aumenta los caudales que se desplazan superficialmente hacia la zona de llanura. Cabe destacar que en el área del acuífero libre se produce la recarga del sistema, que el movimiento del agua en la zona de confinamiento es esencialmente horizontal y que el nivel freático se salinizó debido a que el exceso de riego produce la lixiviación de las sales hacia el cuerpo de agua freática. El agua para los distintos usos se distribuye por la vía superficial y cuando no alcanza se extrae agua subterránea del segundo y tercer nivel. La reciente salinización del segundo nivel en el este mendocino ha determinado la incursión en el tercer nivel, el que ya está dando síntomas de haber iniciado un proceso de salinización. En este sistema todas las aguas excedentes tienen dos destinos posibles: o vuelven al río, que actúa como desagüe natural llevándolas hacia las lagunas de Huanacache o al río Desaguadero, o bien se acumulan en el nivel freático. De hecho, el río Mendoza actúa como drenaje de aguas freáticas en prácticamente toda su extensión.

4. Características del agua subterránea de la cuenca norte

El sistema hídrico de la cuenca norte está formado por los ríos Mendoza y Tunuyán Inferior y por el agua subterránea que abarca toda su extensión, integrando una única cuenca hidrogeológica. Una rápida semblanza de esta cuenca, muestra que:

- De sus aproximadamente 160.000 ha bajo riego, el 42% tiene uso conjunto (esto es, usuarios que tienen derecho de agua superficial y lo complementan con agua subterránea), un 28% tiene agua subterránea como fuente exclusiva, y el 30% restante se riega con agua superficial exclusivamente. Esto es, el 70% del área cultivada depende o está complementada con agua subterránea.
- De alrededor de 19.000 pozos registrados en la provincia, 11.000 actualmente en uso, el 75% se encuentra en esta cuenca.
- El 27% del agua potable en esta cuenca es de origen subterráneo.
- El agua subterránea es la única fuente de agua potable al este del río Mendoza.
- El agua subterránea es la principal fuente de agua para uso industrial.

Desde el punto de vista hidrogeológico, corresponde mencionar lo siguiente:

- Se estima que el volumen total de agua almacenada en la cuenca norte del río Mendoza supera los 600.000 hm³, de los cuales unos 22.000 hm³ resultan económicamente explotables. La capacidad de embalse de la provincia (Carrizal, Nihuil, Valle Grande, Agua del Toro y los Reyunos) suma 1.380 hm³ y si le agregamos el Dique Potrerillos, este guarismo asciende a 1.830 hm³.
- La extensión de la cuenca subterránea es de 22.000 km². En la Figura 4 se presenta una imagen satelital reciente de la cuenca norte. Es importante observar la estructura de la cuenca, la margen derecha del río Mendoza y todo el abanico aluvial irrigado por los ríos Mendoza y



Figura 4. Imagen satelital de la cuenca norte de Mendoza. Año 2001

Tunuyán Inferior. Toda esta área está ocupada por agua subterránea. Es interesante también destacar la zona de surgencia, ubicada donde el acuífero pasa de libre a confinado: en la Figura 4 aparece como un arco de color verde más intenso que se extiende desde el punto en que el río Mendoza cambia su dirección hacia el norte y noreste. Hacia el oeste de este arco se extiende el acuífero libre, en el cual toda el agua infiltrada tarde o temprano alcanza al acuífero. Hacia el este se sabe que los sedimentos van disminuyendo su tamaño, por lo que la transmisividad y rendimiento del acuífero disminuye paulatinamente.

- Realizando un balance del recurso hídrico, puede decirse que los ríos Mendoza y Tunuyán aportan en promedio 2.860 hm^3 . De estos, 686 hm^3 componen la recarga del acuífero (24%). La mayor infiltración ocurre en el lecho del río Mendoza, entre la salida del cañón de Cacheuta hasta El Paraíso en el Departamento de Maipú, donde se infiltran unos 300 hm^3 . De estos, unos 210 hm^3 se infiltran aguas arriba del Dique Cipolletti. La principal recarga del río Tunuyán ocurre en el tramo que va desde el embalse Carrizal hasta el dique derivador Phillips, donde en promedio se recargan un 50 hm^3 anuales. El resto de la recarga proviene de pérdidas en canales e infiltración en áreas cultivadas sobre el acuífero libre.

- Los espesores del relleno aluvial, esto es, la profundidad de material desde la superficie del suelo hasta el Terciario, oscila entre unos 150 y 900 m. Esto se muestra en la Figura 5, donde están demarcadas las líneas que unen puntos con igual espesor de relleno aluvial denominadas líneas isopáquicas. En la medida que la superficie del suelo de la cuenca sigue una forma de suave cono de pendientes decrecientes hacia el este y norte, estas líneas isopáquicas dan una muy buena idea acerca de la forma del basamento cristalino de la cuenca.

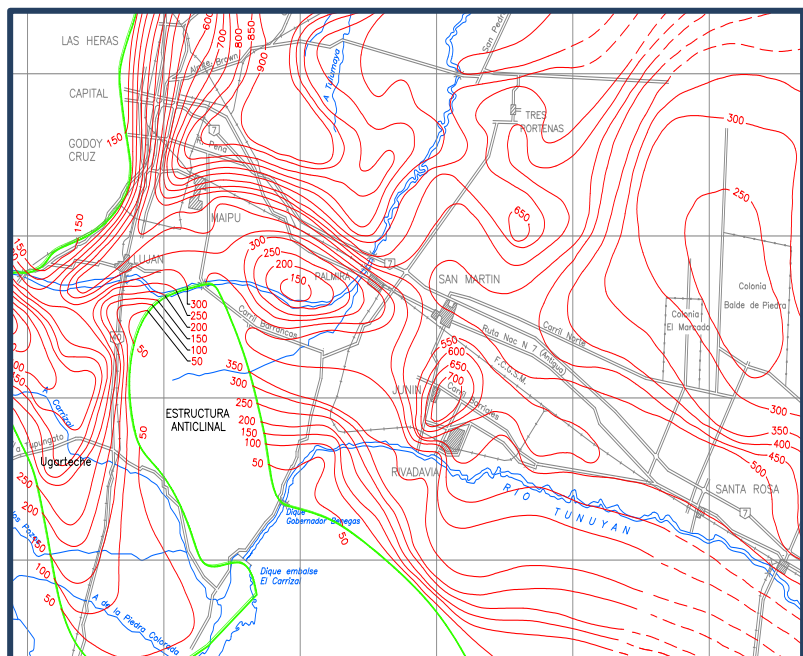


Figura 5. Líneas de igual espesor del relleno aluvial (cuaternario)
Fuente: INA (CRAS y CRA)

Es así como puede observarse una línea divisoria de aguas en la zona de recarga del río Mendoza que es muy importante para determinar cuánto del agua subterránea se desplaza hacia la margen derecha y hacia el resto de la cuenca. Puede también observarse grandes espesores hacia el norte de la cuenca, lo que determina una gran facilidad de flujo en ese sentido. Asimismo, las profundidades son relativamente grandes siguiendo la dirección del río Tunuyán Inferior. Por el contrario, en la zona crítica de San Martín, al este del río Mendoza, se observan importantes elevaciones de la base cristalina, lo que está asociado a menores caudales en desplazamiento horizontal del agua subterránea hacia estos puntos. Para tener una visión gráfica de cómo se desplaza el agua subterránea en el acuífero y los niveles de profundidad que presenta el nivel piezométrico, la Figura 6 muestra la superficie piezométrica y el sentido del movimiento del agua subterránea en la cuenca. Esta menor afluencia horizontal colabora en el proceso de intrusión salina que ocurre con la sobreexplotación de los niveles medio e inferior.

- La profundidad del nivel piezométrico es muy importante. Indica la altura a la que debe elevarse el agua para ponerla en superficie a lo que hay que agregar la depresión que se produce al alcanzar el nivel dinámico. Esta altura total es la determinante del costo de bombeo. Cerca de la zona de recarga del río Mendoza la superficie piezométrica se encuentra a unos 180 m de profundidad. Hacia áreas distales de la cuenca –alejadas de la desembocadura del río en la llanura– los valores se aproximan a los 5 m de profundidad, lo que involucra importantes zonas de Rivadavia, Junín y San Martín.
- Es importante destacar que en la zona de transición entre el acuífero libre y el confinado se da una importante área de surgencia y semisurgencia. Es interesante comparar la Figura 6 con la Figura 7, que muestra en perspectiva la superficie topográfica del terreno en la cuenca norte de Mendoza. La diferencia entre ambas superficies indica la profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico.

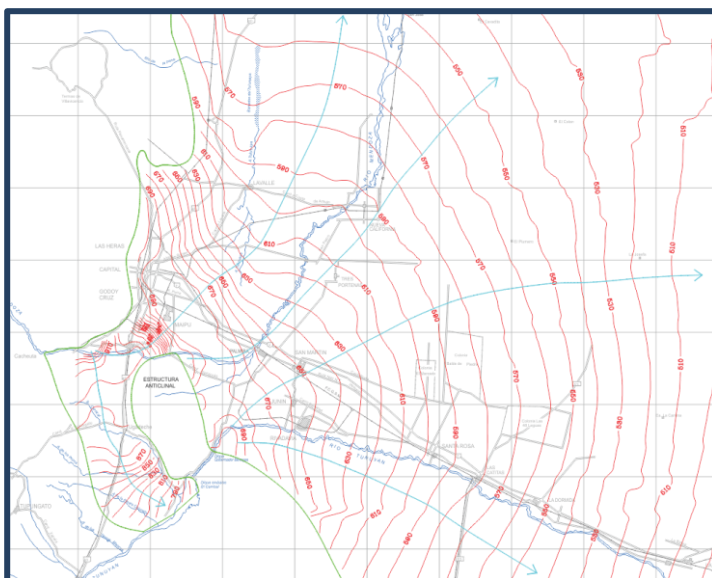


Figura 6: Curvas de nivel de la superficie piezométrica y líneas de flujo preferencial.
Fuente: INA (CRAS y CRA)

Los principales problemas relacionados con el agua subterránea y que afectan a esta cuenca son los siguientes:

- Salinización del nivel medio e incipiente salinización del tercer y último nivel en el este mendocino, fenómeno que afecta en mayor o menor medida a los departamentos de San Martín, Rivadavia, Junín, Santa Rosa y La Paz.
- Revenimiento generalizado en las zonas bajas de la cuenca del río Mendoza y Tunuyán Inferior.
- Sobreexplotación de la subcuenca hidrogeológica de la margen derecha del río Mendoza, también denominada cuenca del Arroyo Carrizal.
- Contaminación petrolera.

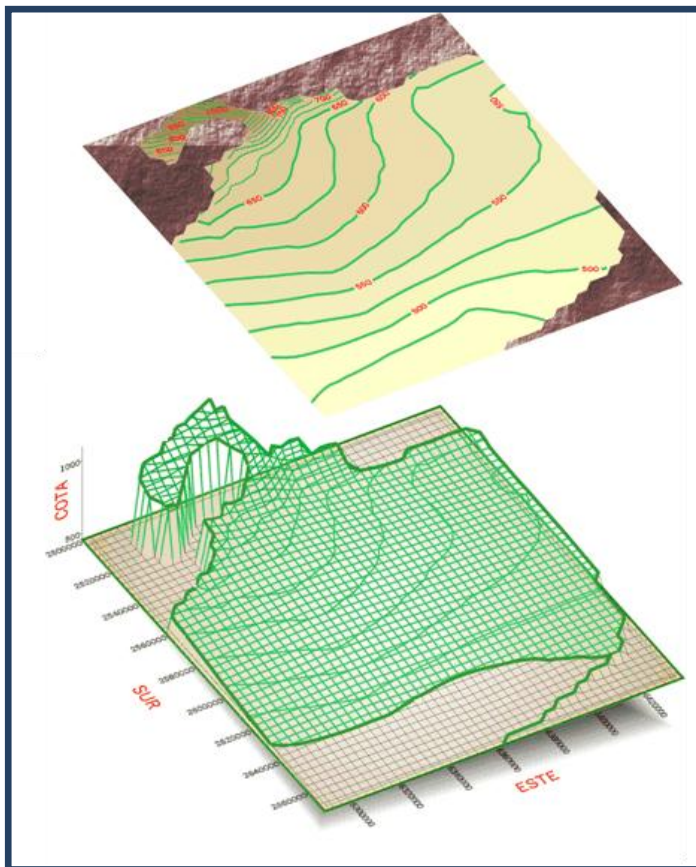


Figura 7. Topografía del suelo en la cuenca norte de Mendoza.

Fuente: INA (CRAS y CRA)

5. Ciclo de sales en la cuenca

Hasta el momento hemos presentado las características generales del sistema hídrico de la cuenca norte de Mendoza, pero hemos prestado poca atención al problema de la calidad del agua. Así como puede seguirse el sentido del agua en la Figura 1, las sales se mueven de la misma manera, ya que es el agua el que las traslada.

a) Salinidad del agua que ingresa en la cuenca

En realidad, el río Mendoza tiene un tenor salino natural que proviene de los distintos materiales con que posee su cuenca imbrífera. Se sabe que el agua del río Mendoza trae unos $\frac{3}{4}$ de mg/litro de sales y varía según el caudal. El Centro Regional de Aguas Subterráneas (CRAS) ha medido variaciones que van desde 588 a 1.130 $\mu\text{mhos/cm}$ lo que muestra que existe una asociación negativa entre el caudal del río y su salinidad. Esto es, a mayor caudal, menor salinidad.

También el caudal afecta la salinidad del agua a lo largo del río: mediciones del CRAS indican que cuando el caudal es del orden de los $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Dique Cipolletti, la salinidad aumenta desde $924 \text{ } \mu\text{mhos}/\text{cm}$ en este punto hasta $1.210 \text{ } \mu\text{mhos}/\text{cm}^1$ en el Dique Gustavo André. Cuando en Cipolletti se observa un caudal de 170 m^3 , valor que excede la capacidad de todos los canales, la salinidad en igual tramo aumenta de 593 a $733 \text{ } \mu\text{mhos}/\text{cm}$ solamente. Finalmente, si se deriva toda el agua por los canales y nada por el lecho del río en Cipolletti, el río continúa actuando como un receptor de aguas freáticas observándose un interesante caudal en el Dique Gustavo André. La conductividad en este último punto oscila entre 2.000 y $2.600 \text{ } \mu\text{mhos}/\text{cm}$. Es importante destacar que el aumento importante en la salinidad para el último caso mencionado ocurre fundamentalmente entre el Dique Cipolletti y el puente de Palmira, permaneciendo desde allí hasta el Dique Gustavo André prácticamente invariante.

Afortunadamente, el agua se recarga en el acuífero entre Cacheuta y El Paraíso (Departamento de Maipú), que es donde presenta los mínimos niveles de salinidad.

Por su parte el agua del río Tunuyán también tiene su salinidad. Para la cuenca norte resulta relevante la salinidad del agua que acumula el Dique Carrizal. Observaciones del CRAS entre 1968 y 1983 indican que la salinidad del agua que ingresa al mismo varió entre 889 y $1.530 \text{ } \mu\text{mhos}/\text{cm}$.

b) Salinidad del agua subterránea

El agua subterránea se ha acumulado en el tiempo a través de la continua recarga sobre el acuífero libre que ha producido en el lecho de los ríos, en los canales y en las áreas de riego. En consecuencia, es dable esperar que su salinidad sea un promedio de la salinidad de estas fuentes. Esto se verifica en las zonas de recarga. Pero a medida que nos desplazamos hacia el este, aparecen distintos procesos de salinización de los acuíferos. Estos se pueden identificar claramente en la Figura 8, desarrollada por el CRAS, donde se presentan los tres niveles del sistema subterráneo en distintos planos separados en el espacio. Los niveles de salinidad se representan a través de líneas de isosalinidad. Una línea de isosalinidad se define como aquella que une todos los puntos del acuífero con el mismo nivel de salinidad. Entonces, cuando uno se mueve a lo largo de una curva de isosalinidad, quiere decir que no hay variaciones en la calidad del agua subterránea. Por el contrario, cuando uno salta de una curva de isosalinidad a la vecina se produce un cambio en la salinidad del agua.

¹ Técnicamente, la unidad de conductividad eléctrica (CE) se denomina Siemen/cm, equivalente a la unidad anteriormente denominada mho/cm. En el texto utilizaremos micromhos o μmhos por ser el término más utilizado.

En la Figura 8 puede observarse que ya ha ocurrido una salinización generalizada en el nivel freático en casi toda la extensión del acuífero confinado. Esta fuente no puede utilizarse ni como agua potable ni como agua para riego. No obstante debe recordarse que en la primera mitad del siglo pasado estas aguas eran aptas para todo uso.

Otro aspecto relevante que se destaca en la Figura 8 es que a partir de la década de los '70 se comienza a notar un aumento en la salinidad del nivel medio en la zona este, que se encuentra entre los 80 y 150 m de profundidad. Llamamos áreas críticas a aquellas donde el problema de la salinización es más intenso.

En la Figura 9 puede observarse el aumento de salinidad del agua en el segundo nivel, que se dio a lo largo de la década 1981 – 1991. Cabe destacar que la última observación que allí figura corresponde a lo que ocurrió hace 10 años. En este momento el Centro Regional Andino (CRA)² se encuentra midiendo los niveles actuales de salinidad para actualizar estas curvas. De acuerdo con el testimonio de los censistas, la situación se ha agravado en relación con 1991.

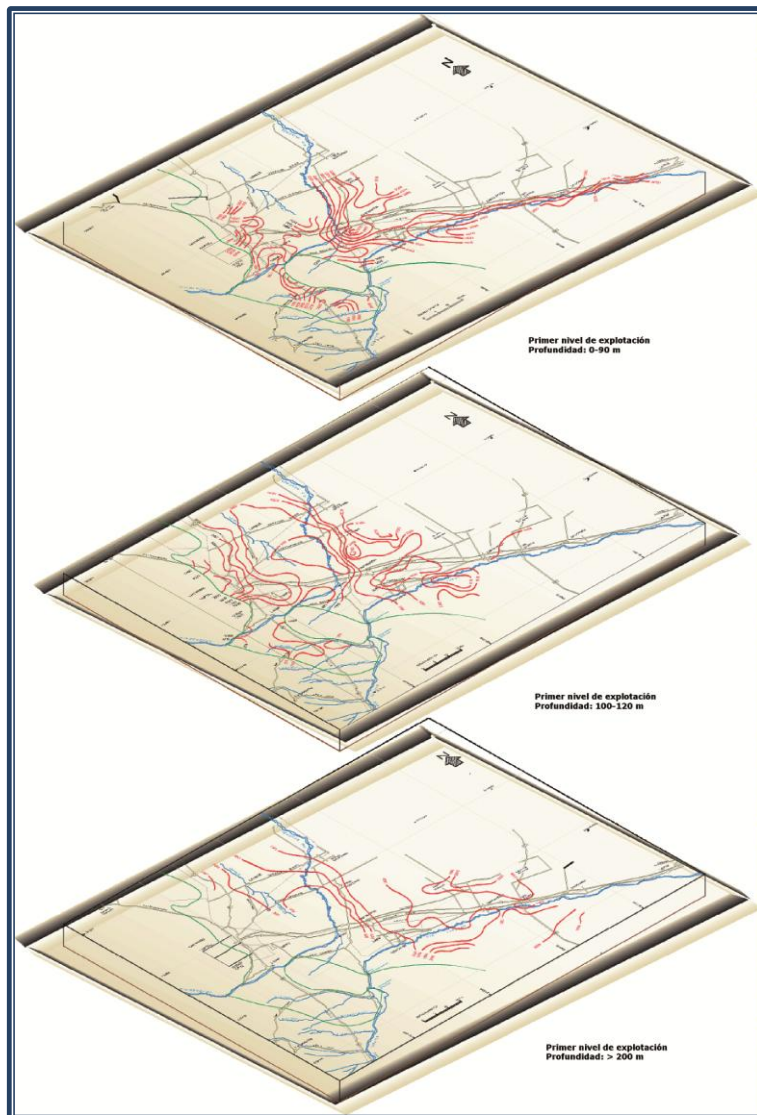


Figura 8. Curvas de isoconductividad eléctrica para los tres niveles de profundidad - Período 1992
Fuente: INA (CRAS y CRA)

² El Grupo Zonal Mendoza del CRAS se integró al CRA en el reciente pasado por lo que las tareas relativas al agua subterránea actualmente son realizadas por el CRA.

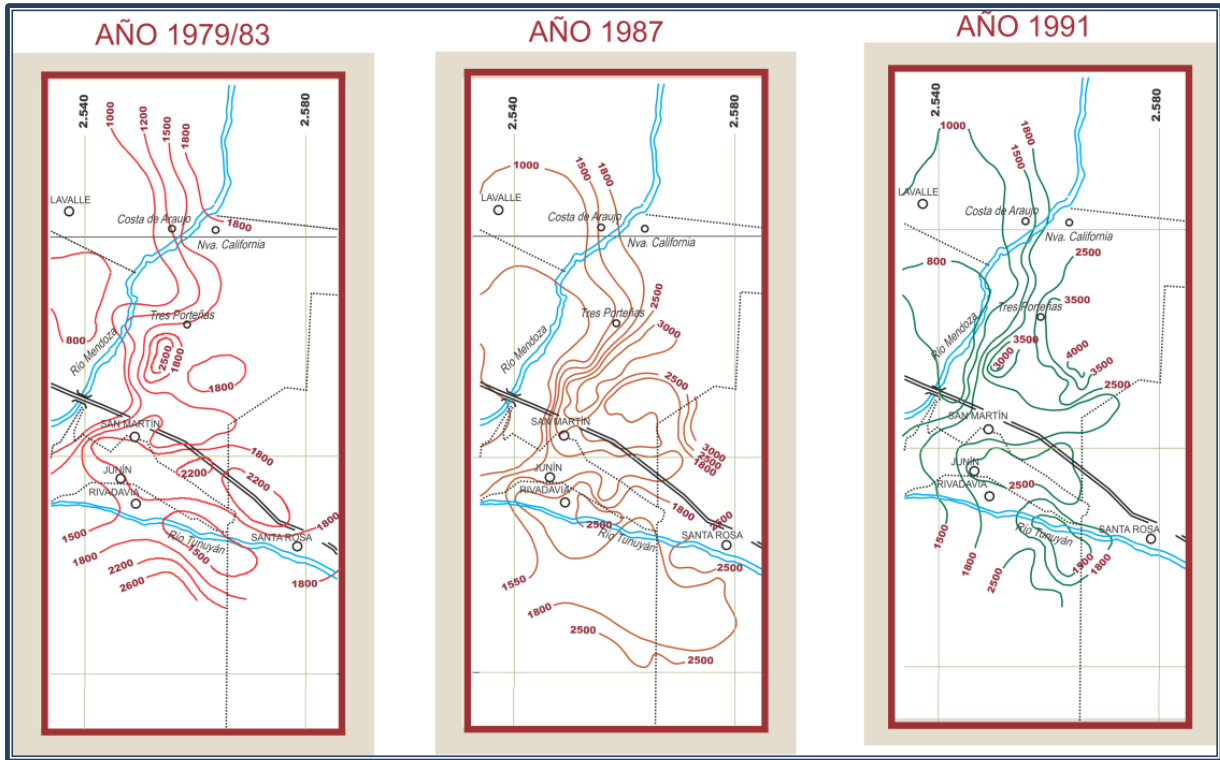


Figura 9. Curvas de isoconductividad eléctrica - II Nivel. Cuenca Norte – Área Central.

Fuente: INA (CRAS y CRA)

Es importante destacar que la principal zona crítica del segundo nivel, en la que predominan las explotaciones que hacen uso exclusivo del agua subterránea, coincide con el área que muestra las líneas de mayor nivel de salinidad, coincide en cierta medida con el estrechamiento del espesor del material cuaternario que conforma el acuífero y que se presenta en la Figura 5. Esto indica que al haber mayor extracción de agua menores y flujos de agua provenientes de la zona de recarga hacia estas zonas no se produce la “purga” natural de sales que debe ocurrir hacia el este y norte, ya que este estos flujos están ampliamente superados por el proceso de intrusión desde el nivel freático.

c) Como se acumulan las sales en el nivel freático

Una vez regado un suelo en un área cultivada, comienza a producir la concentración de sales por el proceso natural de evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas (esto se llama evapotranspiración). Las plantas utilizan agua pura y absorben solamente aquellos elementos (sales) que va a utilizar en su metabolismo, por lo que el resto de las sales permanece en el suelo y se va concentrando. En el próximo riego estas sales acumuladas son arrastradas por drenaje profundo (lixiviación) e ingresan al perfil saturado del nivel freático.

Además del proceso descrito en el área regada, en la salinización del nivel freático también influyen todas las plantas xerófilas de la zona árida que, con su sistema radicular profundo, extraen el agua colaborando en la concentración de las sales.

Siguiendo el flujo del agua en el esquema de la Figura 1, es el nivel freático el que va recibiendo los residuos de todas las sales del sistema, provengan éstas del agua superficial o del agua subterránea. Cuando el nivel freático se eleva, produce problemas de revenimiento y salinización de suelos.

En las Figuras 1 a 3 también puede observarse el nivel piezométrico del agua subterránea. En el acuífero libre, este nivel indica la altura del agua en el acuífero. Desde este nivel hacia abajo se denomina perfil saturado y hacia arriba perfil insaturado. Toda el agua que drena en profundidad, tarde o temprano, se incorpora al perfil saturado.

En el área del acuífero confinado, el primer nivel o nivel freático es un acuífero libre, por lo que el nivel de agua del freático es su nivel piezométrico. En el caso de los acuíferos propiamente confinados, el nivel piezométrico es el punto hasta donde asciende el agua libremente a través de la tubería de un pozo y no es necesariamente igual al nivel freático. Por ejemplo, en la zona de surgencia la presión (nivel piezométrico) de los acuíferos confinados es mayor que el nivel freático. Por el contrario, en el este, particularmente en el área crítica de salinización, el nivel piezométrico del segundo (y tercer) nivel es inferior al nivel freático, lo que causa el problema de la intrusión salina a los mantos acuíferos confinados.

d) Cómo se salinizan los acuíferos confinados

Desde hace bastante tiempo se sabe que el agua subterránea en el este mendocino se encuentra bajo un proceso de degradación por salinización. Específicamente, los datos de calidad del agua generados por el CRAS para el nivel medio indican que desde fines de la década de los '70 hasta principios de los '90, la conductividad eléctrica del agua subterránea en una extensa área crítica del este ha aumentado en el orden de los 1500 μmhos por cm. La información más reciente, todavía no procesada, evidencia que el problema se ha seguido agravando en el tiempo. Se sabe que muchos usuarios que bombeaban agua subterránea del segundo nivel, al encontrarse con niveles crecientes de salinidad, profundizaron sus pozos o establecieron nuevas perforaciones para obtener agua de mejor calidad del tercer nivel. No obstante, existe evidencia de que el proceso de salinización del nivel medio se está extendiendo y ha comenzado a afectar al tercer nivel debido a la intensificación de su explotación.

La intrusión salina desde el nivel freático ocurre particularmente cuando se bombean grandes caudales de los niveles confinados con fines de riego, particularmente en primavera y verano. Esta situación tiene dos efectos: por un lado, reduce la presión en los acuíferos confinados, y por el otro, al regar intensivamente y con altas pérdidas por la baja eficiencia, los excedentes percolados se incor-

poran al nivel freático, aumentando su nivel y su presión. En síntesis, la presión de los niveles inferiores disminuye y aumenta la del freático. Esta diferencia de presión produce la intrusión salina desde el freático hacia el nivel medio y, eventualmente, hacia el tercer nivel.

La intrusión salina desde el freático hacia los niveles inferiores ocurre por dos vías: por pasaje del agua salina a través del semiconfinamiento o a través de pozos rotos o mal cementados. Hasta hace relativamente poco tiempo se sospechaba que el principal causante de la salinización de los niveles inferiores era la existencia de pozos rotos o mal cementados. El CRAS estima que más del 30% de los pozos se encuentran en malas condiciones. Actualmente se sabe que el principal responsable de la salinización es la intrusión salina que ocurre a través de los semiconfinamientos, lo que está inducido por las diferencias de presión mencionadas en el párrafo anterior. Esto equivale a decir que el cegado de los pozos en mal estado permite mitigar el problema de salinización, pero no lo resuelve. La Figura 8 muestra el proceso de intrusión salina en un pozo sano, en un pozo mal cementado, un pozo roto, y en uno que eventualmente puede extraer aguas salinas de formaciones salinizadas del terciario³. La figura también muestra cómo ocurre la intrusión salina a través del semiconfinamiento, siempre desde el nivel freático hacia los niveles inferiores.

En el Anexo I, “¿Cuánta salinización por los pozos y cuánta por el semiconfinamiento?”, se presenta una cuantificación de los aportes relativos a la salinización del nivel medio de los pozos rotos y de la intrusión por el semiconfinamiento.

e) Ensayos para identificar pozos con problemas

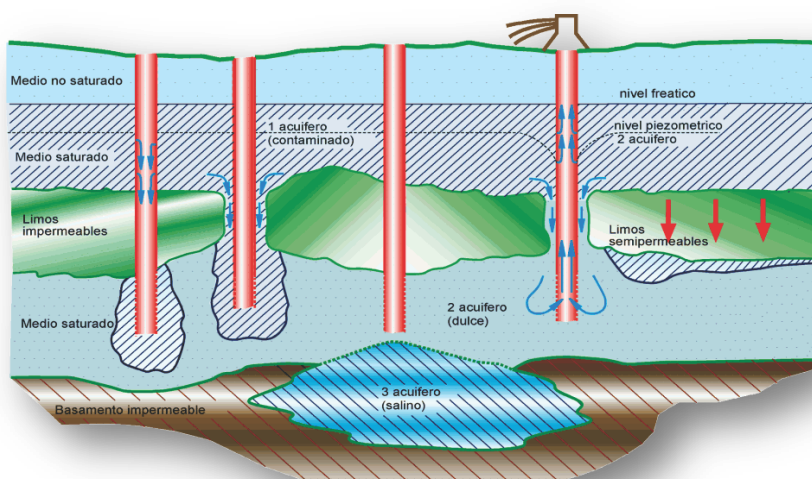


Figura 10. Cómo se produce la intrusión salina.
Fuente: INA (CRAS y CRA)

El CRA ha desarrollado un método muy interesante para detectar el estado de los pozos. Se dice que un pozo no está en buen estado si: a) está mal cementado o directamente no se cementó durante su construcción, o b) si existen roturas en la cañería producidas por corrosión debido al uso de tubería de mala calidad.

³ La presencia de aguas salinas del Terciario es hipotética ya que no se ha constatado la existencia de las mismas al presente.

En ambos casos, el agua salina del nivel freático pasa al segundo nivel de explotación por dos razones: a) porque el agua salada es más pesada, y b) porque al sobreexplotar los niveles inferiores, baja la presión de éstos en relación con la presión del freático. La Figura 10 muestra gráficamente este proceso.

El “ensayo seriado” que realiza el CRA consiste en medir cómo se comporta la conductividad eléctrica (CE, medida en μmhos) del agua bombeada en el tiempo. Se requiere que el pozo haya estado sin funcionar por lo menos 24 horas antes de hacer el ensayo para permitir la intrusión del agua salina si el pozo está roto o defectuoso. Las Figuras 11 y 12 muestran dos resultados posibles.

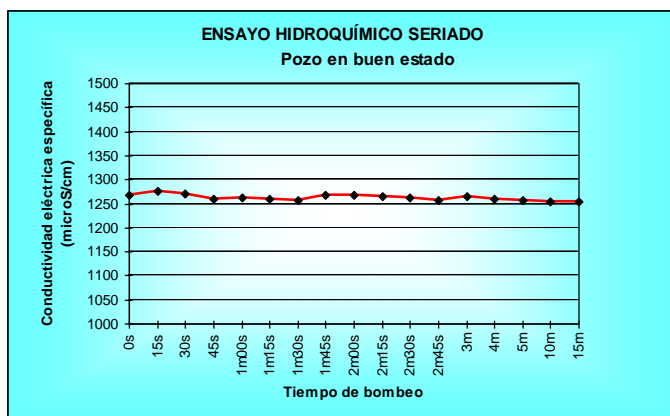


Figura 11. Ensayo hidroquímico seriado de un pozo en buen estado. Fuente: INA (CRAS y CRA)

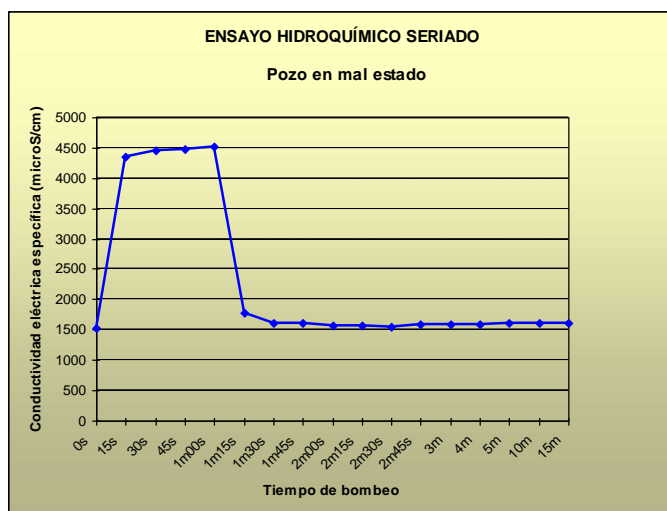


Figura 12. Ensayo hidroquímico seriado de un pozo en mal estado. Fuente: INA (CRAS y CRA)

El pozo de la Figura 11 está en perfectas condiciones, se extrae agua del tercer nivel con una conductividad eléctrica (CE) de 1.200 μmhos sin mostrar ningún tipo de variación en el tiempo. Esto quiere decir que en ningún momento el agua de buena calidad del nivel que se está explotando entra en contacto con el agua freática.

El caso del pozo 12, que extrae agua del segundo nivel, tiene problemas. Al iniciarse el ensayo se observa que durante los primeros segundos de bombeo se vierte el agua que permanecía en la tubería desde el bombeo anterior (1200 μmhos). Luego la CE da un salto hasta 4.200 μmhos para caer luego a 1.200 μmhos , que es la salinidad del acuífero, y allí estabiliza. Este salto significa que el pozo bombea el agua salina que con alta probabilidad se incorporó por una mala cementación.

Existen casos en que el nivel de salinidad del agua extraída es permanentemente superior al agua extraída por los filtros. Supongamos que a pesar de que los filtros se encuentren en el tercer nivel de explotación -donde se sabe que la C.E. es de, digamos, 1.200 μmhos - el agua bombeada luego de un salto se estabiliza en 1.900 μmhos . Esto indica que hay una rotura en la tubería a la altura del nivel freático y que el agua que se extrae es una mezcla entre agua buena y agua salina del nivel freático. En este caso la rotura de la tubería permite la entrada de agua salina al nivel acuífero inferior a través de la tubería y el filtro.

Puede darse una combinación de casos de intrusión salina por mala cementación y por roturas en la tubería.

6. La tragedia de la finca de don Pedro 1: La mecánica del proceso de salinización

Para mostrar cómo ocurre el proceso de salinización del agua subterránea en el nivel freático presentamos el hipotético caso de la finca de don Pedro.

Don Pedro es un buen agricultor que compró una finca en un área del este mendocino que no tenía derecho de riego superficial. Solamente contaba con una napa de agua subterránea de buena calidad con 1.000 $\mu\text{mhos/cm}$ de conductividad eléctrica. El acuífero es libre y presenta las siguientes características: el nivel del agua (piezométrico) está a 5 m de profundidad, el espesor saturado es de 50 m de profundidad y el rendimiento específico⁴ es del 4%. Esto quiere decir que debajo de las 30 ha de don Pedro existe un volumen de agua subterránea de 600.000 m³ (0,6 hm³). Más adelante utilizaremos este volumen para calcular el balance de sales.

Así como don Pedro, existe un grupo de agricultores que desean asentarse en el área aprovechando la presencia de tan buen acuífero. El suelo del área está virgen, y por fortuna está libre de sales de todo tipo.

⁴ Se entiende por rendimiento específico el volumen de agua que drena libremente de una unidad de volumen, del acuífero. Esto es, si se toma 1 m³ intacto del acuífero, que son 1000 litros, se lo coloca sobre un tamiz (colador) y de él escurren 40 litros de agua, se dice que el rendimiento específico del material acuífero es del 4%.

Es así como don Pedro inicia sus actividades, primero nivelando el suelo, instalando una bomba de agua subterránea, preparando el sistema de riego, construyendo los espalderos para plantar 30 ha de uvas finas, etc. Su plan de riego es el siguiente:

- Piensa dar a su viñedo una dotación de $10.000 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ en promedio.

- Para ello hará 15 riegos por año de 20.000 m^3 cada uno, distribuido en las 30 ha.

- Sabe que cada vez hay un exceso de riego de 4.000 m^3 . Su amigo, el Ing. Landrini, le dice que se puede mejorar la eficiencia, pero que una fracción de lixiviación es buena para lavar las sales del perfil.

- El agua que permanece en el perfil del suelo explorado por las raíces antes del próximo riego es de 4.000 m^3 en las 30 ha.

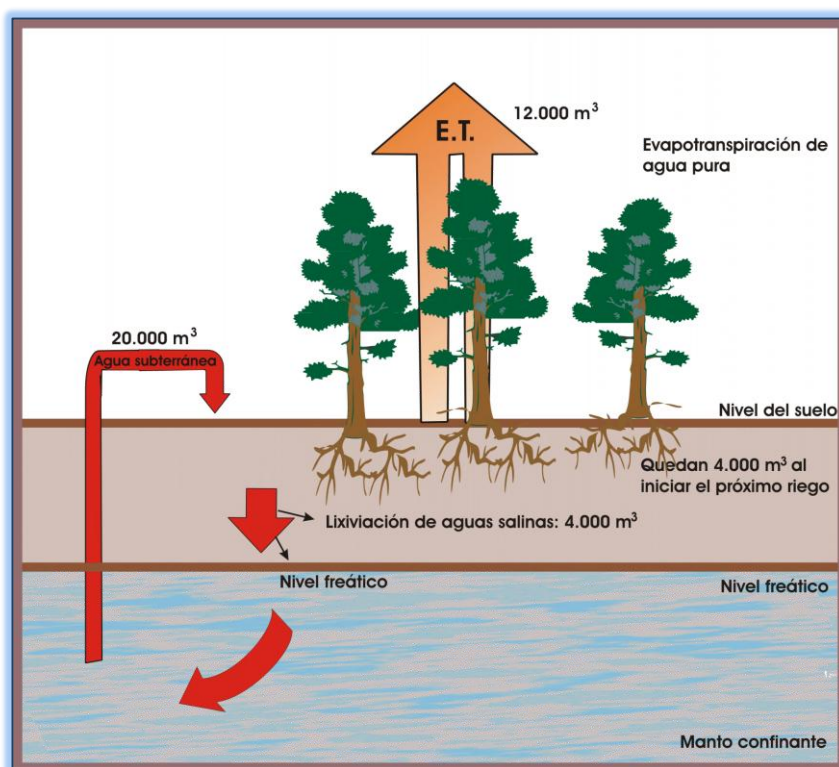


Figura 13. El ciclo del agua y las sales en la finca de don Pedro

- Las condiciones iniciales de salinidad del agua del suelo y del acuífero son de $1.000 \mu\text{mhos}/\text{cm}$.
- En la Figura 13 se puede ver gráficamente cuál es la situación de la finca de don Pedro. Allí se observa una plantación, el nivel del suelo, el perfil del suelo explorado por las raíces y el agua del acuífero. Se aprecia el ciclo del agua: bombeo, riego, evapotranspiración y lixiviación de aguas que se incorporan al acuífero.

Si don Pedro trabaja permanente de esta manera, lo que va a suceder es que el sistema hídrico se va a salinizar hasta tal punto que se haga imposible la agricultura. Veamos cómo sucede este fenómeno:

- En el primer riego, Don Pedro aplica 20.000 m³ con agua de 1.000 µmhos. De estos, 4.000 m³ se incorporan al acuífero por el proceso de lixiviación, quedando 16.000 m³ en el suelo a disposición de las plantas⁵.
- Después de este riego, el proceso de evapotranspiración va produciendo la concentración del agua del suelo, que de 16000 m³ se reduce a 4.000 m³. Esto quiere decir que las sales se concentran 4 veces, pasando de 1.000 µmhos a 4.000 µmhos.
- En el segundo riego, don Pedro agrega otros 20.000 m³ con 1.000 µmhos de conductividad eléctrica. Estos se mezclan con los 4.000 m³ ya presentes en el suelo que tienen 4.000 µmhos, lo que ahora da una salinidad media de 1.500 µmhos⁶.
- Pasan ahora por lixiviación 4.000 m³ con 1500 µmhos al acuífero. En el suelo, el agua se concentrará ahora de 1.500 a 6.000 µmhos antes del tercer riego.
- En el tercer riego, cuando don Pedro agregue 20.000 m³ con 1.000 µmhos, la salinidad resultante será de 1.833 µmhos⁷. Por su lado, la salinidad del acuífero, tras haber recibido 4.000 m³ con 1.500 µmhos, elevará su salinidad de 1.000 µmhos a 1.003 µmhos.
- Este proceso continúa con cada riego aumentando la concentración del agua del suelo y del acuífero. En la siguiente tabla se presenta la evolución de la salinidad durante los primeros 10 riegos.

En la primera columna de la Tabla 1 figura el número del riego, en la segunda la salinidad del acuífero, en la tercera la salinidad del agua del suelo antes del riego y en la cuarta columna la salinidad media del agua del suelo, que es el promedio de las dos columnas anteriores. Para el piensa cálculo de la salinidad del agua subterránea se supone que todos los vecinos de don Pedro riegan en condiciones similares.

Tabla 1. Evolución de la salinidad por riego (µmhos)

Riego	Salinidad del agua subterránea	Salinidad del suelo (pre-riego)	Salinidad del agua del suelo (promedio)
1	1000	1000	1000
2	1000	1500	1250
3	1003	1833	1418
4	1009	2058	1534
5	1016	2213	1614
6	1024	2322	1673
7	1032	2401	1717
8	1042	2461	1751
9	1051	2509	1780
10	1061	2548	1805

⁵ Se supone que en el suelo ya habían unos 4.000 m³ de agua antes del riego.

⁶ La operación matemática es la siguiente simple regla de mezclar: $(20000 \times 1000 + 4000 \times 1000 \times 4) / 24000 = 1500$ *

⁷ La cuenta es $(20000 \times 1000 + 4000 \times 1500 \times 4) / 24000 = 1833$.

En la Tabla 1 hemos considerado solamente lo que sucede a lo largo de los 10 primeros riegos, pero recordemos que don Pedro aplica 15 riegos al año. Veamos ahora lo que sucede a lo largo de los sucesivos años, lo que se reporta en la Tabla 2.

Año	Salinidad del agua subterránea	Salinidad media del suelo (pre-riego)	Salinidad del agua del suelo (promedio)
1	1000	1000	1000
2	1112	2699	1905
3	1294	3145	2220
4	1492	3627	2559
5	1720	4181	2951
6	1984	4821	3402
7	2287	5559	3923
8	2637	6409	4523
9	3041	7390	5215
10	3506	8521	6013

Tabla 2. Evolución anual de la salinidad del agua y del suelo (μmhos)

Como puede apreciarse en este simple ejemplo, la salinidad se acumula a lo largo de una trayectoria exponencial, y en pocos años pierde su aptitud para riego. Este proceso es real, inexorable e ineludible. En todas las situaciones en que ocurre este reciclado del agua de riego fatalmente se termina en la salinización del agua y del suelo.

La única forma de poder mantener controlado el nivel de sales, es incorporando algún mecanismo para la eliminación de las aguas de lixiviación. Esto es lo que normalmente se persigue mediante el drenaje. Más adelante volveremos sobre este tema, analizando cómo este problema afecta los rendimientos

de los cultivos y como afecta la caída de ingresos.

7. Efecto de la salinidad en los cultivos

Para ningún agricultor es novedad que las plantas sufren en presencia de salinidad. Ésta puede provocar diversos síntomas, pero en general reduce el vigor y la productividad. En la encuesta realizada en el área crítica que se menciona en la Sección 9a más adelante, uno de los resultados indica que aquellos productores que todavía no habían podido acceder al tercer nivel y seguían regando con agua del segundo nivel, ya salinizada, obtenían rendimientos 37% más bajos.

En primer lugar, hay que diferenciar entre la salinidad el agua de riego y la salinidad del suelo. Recordemos el caso de la finca de don Pedro: en el primer riego, él aplicó agua de 1.000 μmhos , que es la salinidad del agua de riego. Pero una vez aplicada al suelo, al ocurrir el proceso de evapotranspiración, el agua del suelo se concentró hasta alcanzar 4.000 μmhos . En las Tablas 1 y 2 hemos presentado la evolución de la salinidad del agua de riego y por separado la salinidad del suelo.

Es evidente que la salinidad del agua del suelo es siempre superior a la salinidad del agua de riego. ¿Cuán superior? Depende principalmente de la textura del suelo, de la frecuencia de riego, de la

lámina aplicada, de las condiciones de drenaje, y del comportamiento de la mezcla y movimiento del agua en el suelo. En general, la salinidad del suelo es entre 2 y 4 veces superior a la salinidad del agua con que ese suelo se riega.

La salinidad del suelo se mide en el “extracto a saturación”: se coloca una muestra de suelo en un recipiente, se agrega agua destilada hasta que esté totalmente saturado, pero sin exceso de agua en la superficie, y allí se mide la CE mediante un conductímetro.

a) Salinidad del agua de riego

La Estación Experimental Agropecuaria del INTA en Mendoza (INTA-EEA Luján - Mendoza) ha preparado material especial para ilustrar a los agricultores acerca del uso de aguas con distintos niveles de salinidad.

A continuación se presenta una clasificación de las aguas para riego y tres tablas que indican la tolerancia de los frutales, hortalizas y forrajeras a la salinidad. También se presenta la calidad del agua de riego necesaria para que los cultivos logren una máxima producción.

Peligrosidad Salina	Conductividad Eléctrica en μmhos
Baja	Menos de 1.000
Media	1.000 a 2.000
Media Alta	2.000 a 3.000
Alta	3.000 a 4.000
Muy Alta	Más de 4.000

*Clasificación de las aguas para riego.
Fuente: INTA – EEA Luján - Mendoza*

	Muy sensible	Sensibles	Resistentes	Muy resistentes
	Almendro Cerezo Ciruelo europeo Damasco Duraznero Limonero Naranja Manzano	Peral Vid	Ciruelo japonés Granado Higuera Olivo	Palmera Datilera
Suelo Arcilloso (Pesado)	500	1.000	1.500	2.000
Suelo Franco (Medio)	1.000	1.500	2.000	2.500
Suelo Arenoso (Suelto)	1.500	2.000	2.500	3.000
	Salinidad máxima del agua de riego para no disminuir la producción en μmhos			

Tolerancia de los frutales a la salinidad y calidad del agua de riego necesaria para una máxima producción. Fuente: INTA – EEA Luján - Mendoza

	Muy sensible	Sensibles	Resistentes	Muy resistentes
	Poroto Rabanito Zanahoria	Ajo Apio Batata Berenjena Coliflor Lechuga Maíz Melón Nabo Papa Pepino Pimiento Sandía Tomate Zapallo	Alcaucil Cebolla Espinaca Remolacha Zapallito	Acelga Espárrago
Suelo Arcilloso (Pesado)	500	1.000	1.500	2.000
Suelo Franco (Medio)	1.000	1.500	2.000	2.500
Suelo Arenoso (Suelto)	1.500	2.000	2.500	3.000
	Salinidad máxima del agua de riego para no disminuir la producción en μ mhos			

Tolerancia de las hortalizas a la salinidad y calidad del agua de riego necesaria para una máxima producción. Fuente: INTA – EEA Luján - Mendoza

	Muy Sensible	Sensibles	Resistentes	Muy Resistentes
	Trébol ladino Trébol rojo	Alfalfa Alpiste Avena Centeno Trébol blanco	Soja sorgo Trigo	Cebada
Suelo Arcilloso (Pesado)	500	1.000	1.500	2.000
Suelo Franco (Medio)	1.000	1.500	2.000	2.500
Suelo Arenoso (Suelto)	1.500	2.000	2.500	3.000
	Salinidad máxima del agua de riego para no disminuir la producción en μ mhos			

Tolerancia de las forrajeras a la salinidad y calidad del agua de riego necesaria para una máxima producción. Fuente: INTA – EEA Luján - Mendoza

b) Salinidad del agua del suelo

Las plantas responden al nivel de salinidad del agua del suelo. En este sentido existe una profusa experiencia acumulada a nivel internacional, que está probada y que podemos utilizar como herramienta de trabajo, para identificar la manera en que la salinidad del suelo afectará los rendimientos de nuestros cultivos.

En la sección anterior identificamos la sensibilidad de varios cultivos a la salinidad del agua de riego. Ahora presentamos las funciones de pérdidas de rendimiento de los cultivos por salinidad del suelo.

Se admite que las plantas responden a la concentración de sales en el agua del suelo, lo que ocurre como indica en la Figura 14, salvo que exista una alta proporción de sodio, de cloro o presencia de boro.

En la Figura 14 puede apreciarse que para bajos niveles de salinidad del suelo no se afectan los rendimientos de un cultivo dado. Pero cuando se llega al umbral crítico de salinidad del suelo CE^* , los rendimientos empiezan a caer linealmente ésta aumenta, llegando eventualmente a cero. Esta es la línea de respuesta.

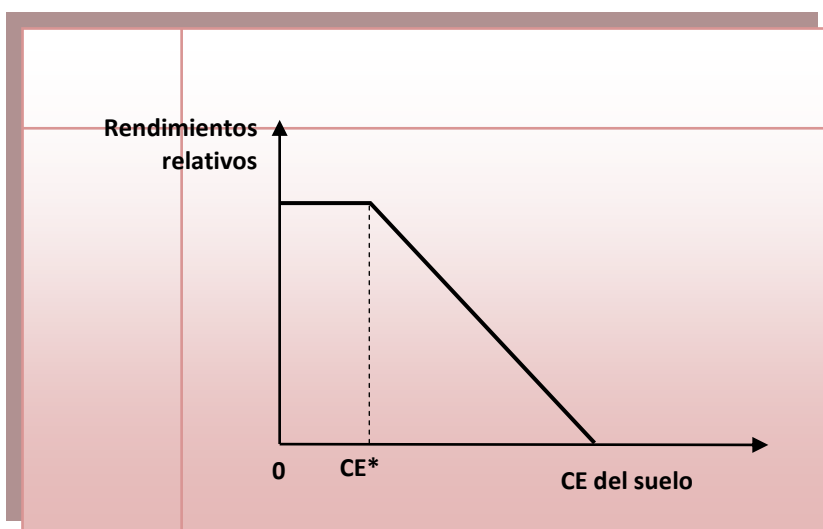


Figura 14. Rendimiento de un cultivo en función de la salinidad del suelo

Mientras más sensible es un cultivo, menor es su CE^* , y su línea de respuesta es más vertical. A continuación se presenta un conjunto de funciones para los principales cultivos de nuestra región.

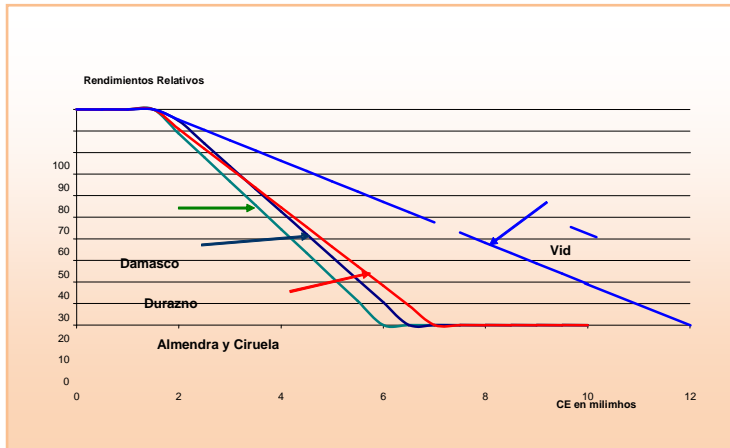


Figura 15. Rendimientos de frutales en función de la salinidad del suelo
Fuente: Mass (1976)

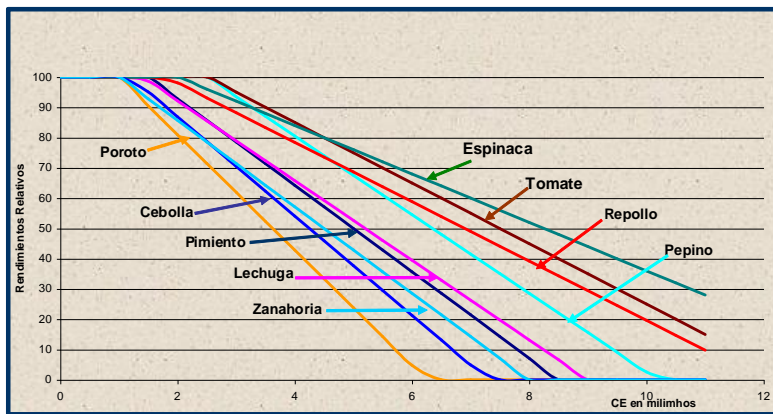


Figura 16. Rendimientos de hortalizas en función de la salinidad del suelo
Fuente: Mass (1976)

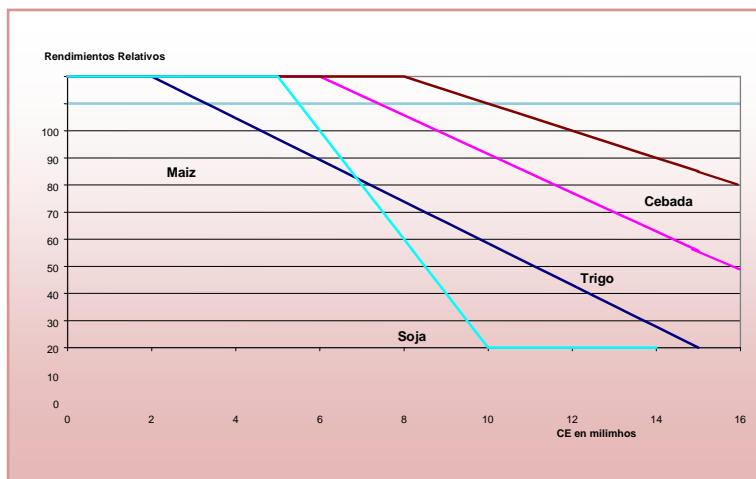


Figura 17. Rendimientos de forrajeras en función de la salinidad del suelo
Fuente: Mass (1976)

c) Efectos de la salinidad del suelo en la rentabilidad del productor

En las secciones anteriores hemos visto cómo la salinidad del agua de riego determina la salinidad del suelo y ésta, a su vez, tiene un efecto directo en los rendimientos de los cultivos. Resulta claro, entonces, que a medida que la salinidad del suelo aumenta, los rendimientos de los cultivos se deprimen y, consecuentemente, los ingresos del productor caen.

Cuando se da una situación de caída de ingresos ante una estructura de costos que no se reduce, llega un momento en que la rentabilidad se desvanece. Sin rentabilidad, el productor puede tener la opción de endeudarse, siempre que le resulte factible, razonable y de cambiar el perfil de los cultivos por otros más resistentes a la salinidad, o bien lo más probable que es que abandone la actividad dejando la finca con suelos ya salinizados.

Para analizar este problema más de cerca, volvamos a la situación de la finca de don Pedro, donde pudimos establecer la manera en que aumenta la salinidad del suelo. Ahora veremos cómo este aumento de la salinidad del suelo determina la caída en los rendimientos y la consecuente caída en los ingresos de la finca.

8. La tragedia de la finca de don Pedro 2: Pérdida de rentabilidad por salinización

Comencemos por revisar la Tabla 2, que presenta la evolución de la salinidad de agua de riego y de la salinidad del suelo en el caso de la finca de don Pedro. En ella podemos observar la evolución de la salinidad del suelo para un período de 10 años. Veamos ahora cómo esta evolución afecta los rendimientos de la vid y la rentabilidad de la empresa.

Recordemos en primer lugar que don Pedro contaba con 30 ha de viñedo de uvas finas recién establecido con. Lo más probable es que don Pedro, siguiendo los buenos precios que se han dado en el mercado en el reciente pasado, se haya dedicado a variedades como Cabernet, Malbec o Merlot. De acuerdo con datos de la Bolsa de Comercio, los rendimientos de estas variedades finas en el Departamento de San Martín para el año 2001 fueron de aproximadamente 104 quintales por ha. Para el caso de don Pedro, como es una finca nueva y bien establecida, vamos a suponer un rendimiento de 120 quintales por ha.

La Bolsa de Comercio también informa los precios de estas variedades en los últimos años, que evidentemente marcan una importante declinación: desde un precio promedio para las tres variedades de \$ 85 por quintal en 1999, el precio en el año 2000 fue de \$ 70 para y solamente de \$ 51,33 en el 2001. Estos valores responden a precios financiados. Para hacer las proyecciones a futuro, supondremos que los precios se mantienen en el valor del año 2001.

Año	En una plantación en producción	En una plantación nueva
1	120	0
2	115	12
3	112	34
4	108	97
5	103	103
6	98	98
7	92	92
8	85	85
9	78	78
10	68	68
11	58	58
12	46	46
13	32	32
14	16	16
15	0	0
16	0	0

La Tabla 3 muestra la evolución del rendimiento de la vid en el tiempo como función del aumento en la salinidad del suelo. En la primera columna figura el tiempo en años. En la segunda columna se presenta la evolución de los rendimientos si el viñedo ya hubiese estado en producción al momento de iniciar sus actividades, mientras que en la columna 3 figuran los rendimientos partiendo del supuesto que don Pedro realice la plantación al inicio del primer período. En esta columna se puede apreciar el aumento del rendimiento, que alcanza su plenitud en el quinto año, y luego la consecuente reducción producto de la salinización del suelo.

Tabla 3. Rendimiento de uva (qq/ha)

La Tabla 4 que se presenta a continuación contiene la evolución de los ingresos totales para la finca de don Pedro. Los valores en estas tablas se calculan multiplicando los rendimientos presentados en la Tabla 3 por el número de hectáreas y por el precio de la uva. En la primer columna figura el año, en la segunda los ingresos totales para el caso de una plantación que se ya se encuentra en producción -y en buen estado vegetativo-, la tercer columna indica los ingresos para el caso de una plantación nueva, y la última columna muestra los ingresos totales en el caso que no hubiesen problemas de salinidad.

En las columnas 2 y 3 de la Tabla 3, independientemente del momento en que haya comenzado la producción, se ve que al año 15 los rendimientos ya caen a cero. Para el año 11 los ingresos resultan ser menos del 50% de lo que debería ser sin condiciones de salinidad. Si bien no

Año	En una plantación en producción	En una plantación nueva	Sin problemas de salinidad
1	184800	0	184800
2	177666	17767	184800
3	172133	51640	184800
4	166156	149541	184800
5	159264	159264	184800
6	151318	151318	184800
7	142156	142156	184800
8	131592	131592	184800
9	119412	119412	184800
10	105368	105368	184800
11	89176	89176	184800
12	70506	70506	184800
13	48980	48980	184800
14	24160	24160	184800
15	0	0	184800
16	0	0	184800
VAB 10%	\$ 1.041.825	\$ 639.799	\$ 1.445.821
VAB 7%	\$ 1.196.544	\$ 773.137	\$ 1.745.741

Tabla 4. Evolución de los Ingresos totales

hemos considerado en este ejemplo los costos de la finca de don Pedro (que incluyen los costos de llevar adelante prácticas culturales, fertilización y desinfección, reposición de plantas, gastos de cosecha, costos de operación y mantenimiento de la bomba de agua subterránea, etc.) resulta claro que se está en un punto donde los ingresos por hectárea son iguales a los costos por hectárea. De todas maneras, en cuatro años más los rendimientos se desvanecerán totalmente llevando los ingresos totales a cero.

En las últimas dos filas de la Tabla 4 se ha incluido un indicador económico del resultado de los tres casos presentados, que es el Valor Actual de los Beneficios (VAB)⁸.

En estas dos últimas filas de la Tabla 4 se presenta el Valor Actual de los Beneficios para cada una de las alternativas planteadas utilizando tasas de descuento del 10% y del 7%. Si se compara el Valor Actual de los Beneficios descontados a una tasa del 10% para las columnas 2 y 4, en los casos en que la plantación se encuentra con y sin problemas de salinidad, los costos de la salinidad –en términos de VAB- son superiores a los \$ 400.000.

En la Figura 18 se muestra gráficamente la evolución de los ingresos totales para los tres casos planteados: el caso de un viñedo ya en producción sujeto al proceso de salinización, el caso de un viñedo nuevo recién implantado, y la situación en la cual no existe salinidad. El gráfico es por demás elocuente acerca de la naturaleza de la incidencia de la salinidad no sólo en el resultado económico, sino en la sustentabilidad de la finca de don Pedro.

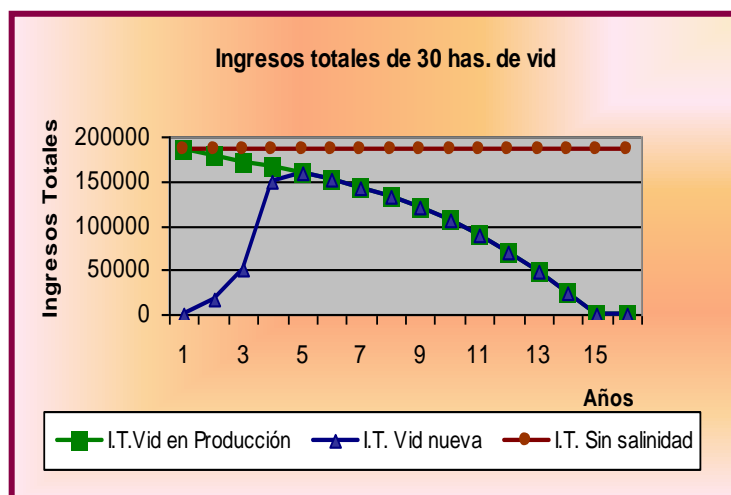


Figura 18. Evolución de los ingresos totales para los casos con y sin salinización

⁸ El Valor Actual de los Beneficios es el valor que proviene de sumar todos los beneficios en pesos que Don Pedro puede obtener por año a lo largo de los 16 años presentados en la Tabla 4. Para traer el valor futuro del año t al presente (año 0), se lo actualiza dividiéndolo por $(1+r)^t$ donde r es la tasa de descuento. Se realiza esta operación para cada uno de los 16 años en cuestión y se suman los valores.

En un principio, don Pedro comenzó con excelentes condiciones de calidad de agua para llevar adelante su actividad agrícola. Al poco tiempo vio que sus esfuerzos se frustraban cuando aparecieron síntomas de salinización y el rendimiento de los cultivos bajó (hojas de vid más pequeñas, falta de color y vigor en las plantas, etc.). Si don Pedro no consigue una fuente adicional de agua, tendrá inexorablemente que abandonar su finca.

Este es un ejemplo representativo en cierta medida de lo que está ocurriendo a nivel zonal en el este de la cuenca norte, específicamente en los departamentos de San Martín, Rivadavia y Junín. Por fortuna, en el este han podido utilizar el tercer nivel de explotación para mantenerse en la actividad. Pero por las mismas razones por las que se ha salinizado el segundo nivel, si no se toman medidas concretas, el tercer y último nivel disponible terminarán también salinizándose. Esto se analiza en la Sección 9.

Pero don Pedro no está solo: afecta a sus vecinos y es afectado por ellos, por lo que también la sustentabilidad de toda el área se verá afectada. Es la acción de todos la que determina la forma en que se producirá la degradación del agua subterránea.

9. Don Pedro y la Tragedia de los Comunes

En las secciones 6 y 8 hemos efectuado un análisis estrictamente particular de la finca de don Pedro. Ahora incorporamos el supuesto de que todos los vecinos que lo rodean también se dedican a la agricultura bajo riego y bombean desde el mismo acuífero. En este contexto don Pedro contribuye a la salinización de su porción del acuífero, pero también cada uno de sus vecinos hace exactamente lo mismo y en la misma medida. Puede decirse que cada agricultor, con su acción, está afectando a todo el acuífero, salinizando un recurso que es común.

Para presentar más claramente este caso, supongamos que don Pedro es el único productor en toda el área y que en vez de considerar los $0,6 \text{ hm}^3$ que yacen bajo su propiedad, es el único usuario en un área de 30 km^2 . Esto implica que él dispone de un acuífero 100 veces mayor que el que hemos utilizado como base de cálculo. En este caso, don Pedro va a demorar 100 veces más en salinizar el acuífero y entonces la caída de los rendimientos será del 96% recién a los 100 años. Don Pedro ni notará como ocurre el proceso de salinización y la salinidad del agua y del suelo serán prácticamente constantes en el tiempo. Se sentirá viviendo en un contexto totalmente sustentable.

El hecho de que aparezcan otros regantes vecinos, significa que la salinidad del acuífero aumentará y deprimirá los rendimientos de don Pedro. Este problema, que se presenta como un efecto negativo, en economía se llama externalidad. No hay mecanismo de mercado que le permita a don Pedro cobrar una compensación a sus nuevos vecinos por el daño que le infieren, ni éstos tienen por qué pagarle. Esto es lo que se denomina la "tragedia de los comunes". Don Pedro no tendrá incentivos para

usar menos agua o para adoptar tecnologías que le permitan purgar las sales que por la vía de sus lixiviados salinicen al agua subterránea, ya que nadie le garantiza que sus vecinos harán lo mismo. Y esto conduce a la salinización prematura del sistema hídrico.

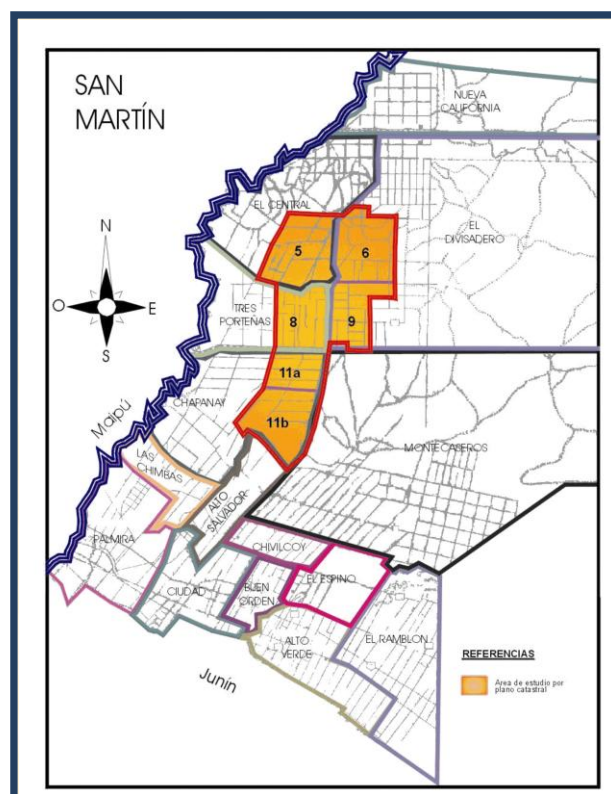
Recíprocamente, al llevar adelante su actividad, don Pedro genera costos a sus vecinos. No tiene motivación alguna para compensarlos ni para pedirles que lo compensen por reducir sus aportes a la salinización del bien común.

La única forma de controlar estos problemas es mediante la acción colectiva, ya sea por común acuerdo entre todos los usuarios del agua para cumplir ciertas reglas de juego, o mediante la acción de una autoridad de aplicación con poder de policía para asegurar el cumplimiento de reglas de juego apropiadas.

10. Estructura y funcionamiento del agua subterránea en el área crítica

Hemos presentado el problema general de la salinización en la región; hemos centrado la atención en un caso particular muy sencillo, como, es el de la finca de don Pedro; hemos presentado información relevante para cuantificar el fenómeno y hemos descrito el mecanismo que produce la salinización del agua subterránea. Ahora resulta necesario desarrollar un instrumento que permita evaluar las distintas acciones que pueden plantearse para controlar el proceso de salinización y conocer el impacto relativo de cada una. Para centrar nuestra atención en el área crítica propiamente dicha, utilizamos la información relevada mediante una encuesta en el año 1996-97.

Figura 19. Área de estudio afectada por la salinización de los acuíferos. Departamento San Martín, Mendoza
Fuente: G. Fasciolo (1997)



a) El área crítica seleccionada

En el año 1996 el Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua (CELA) realizó una encuesta para estudiar el problema de la salinización del agua subterránea. Para ello se trabajó en el área crítica identificada con la información presentada en las Figuras 8 y 9 elaborada por el CRAS; en la Figura 19 se define el área relevada y en la Figura 20 se muestra el área de restricción a la instalación de nuevos pozos definida por el DGI.

A continuación se presentan algunos datos relevantes para caracterizar la problemática del área y para utilizarlos en la formulación del modelo. El área relevada es del orden de las 14.000 ha. Se efectuó del 30% de las propiedades y se halló que el tamaño medio de las fincas es de

52,1 ha y con una superficie cultivada promedio de 31,9 ha. El cultivo de vid ocupa más del 87% de la superficie agrícola. La unidad de análisis en todos los casos corresponde a propiedades con pozos de agua subterránea, sean estos para riego o no, (toda propiedad con pozo fue considerada para el relevamiento). Se encuentran así fincas que tienen al agua subterránea como fuente exclusiva mientras que otras, la mayoría, hacen un uso conjunto de agua superficial y subterránea.

Para el área relevada se estima un total de 546 pozos. De estos, 84 se encuentran abandonados y no cegados, 63 han sido cegados o tapados, 281 están asignados específicamente al riego, y 117 no están destinados a riego.

La superficie agrícola total calculada sobre la base de la información muestral (solo fincas con pozo) arroja un valor de 13.573 ha para el área crítica estudiada. Si este valor se compara con el área total

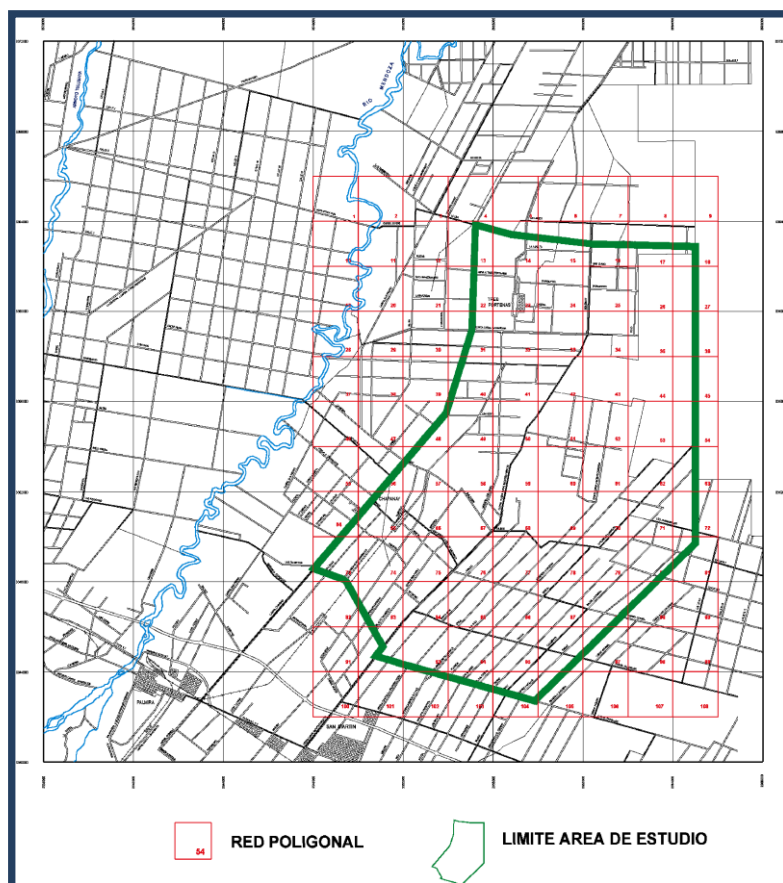


Figura 20. Área de restricción al desarrollo de nuevas perforaciones INA (CRAS y CRA)

calculada sobre la base cartográfica, que arroja un valor de 14.026 ha, puede decirse que prácticamente en todos los casos existe uso conjunto. Esto es, casi todas las fincas del área tienen pozo.

Se debe destacar una serie de aspectos que surgen del relevamiento, por su incidencia en la naturaleza del fenómeno de salinización del acuífero. El primero de ellos es que en toda la zona relevada los suelos son predominantemente arenosos, siguiendo los francos aunque en menor proporción. Esto hace que la permeabilidad del suelo sea sumamente alta, lo que facilita enormemente el proceso de lixiviación de sales del perfil. Esto corrobora estudios anteriores realizados por el CELA, en los cuales se observa que la salinidad del suelo (conductividad eléctrica del estrato a saturación) supera por muy poco valor a la conductividad eléctrica del agua de riego. La relación entre ambas desciende en algunos casos a 1,1, siendo siempre menor de 2. Estos elementos indican que en verano el agua de riego drena fácilmente, lixiviando rápidamente las sales del suelo e incorporándose al nivel freático. Además de esto, se sabe que los suelos arenosos requieren una mayor cantidad de agua de riego que otro tipo de suelos. Estos dos factores inducen a pensar que durante el verano el nivel freático debe aumentar sensiblemente, lo que facilita la intrusión salina desde el freático.

Otro aspecto digno de ser destacado es el desconocimiento de los regantes y otros operadores del agua con respecto a la naturaleza de la salinización del acuífero. Saben que el agua subterránea pierde su calidad pero son incapaces de dar una explicación del fenómeno. Por otro lado, los productores del lugar tienen la clara percepción de que, para obtener agua de buena calidad, los pozos deben tener los filtros por debajo de los 180 metros. De otra manera -expresan cabalmente- se obtiene agua de muy mala calidad.

Finalmente, en los casos en los que los regantes informan sobre problemas de salinización asociados con pérdidas en la producción, se indican caídas en los rendimientos del orden del 37%. Dado que la vid es un cultivo bastante resistente a la salinización del suelo, esta tasa de reducción indica altos niveles de conductividad eléctrica en el mismo. De acuerdo con la bibliografía internacional, una caída en el rendimiento de esta naturaleza está asociada con una conductividad del suelo de 5.385 μmhos .

b) Un modelo para describir el proceso de salinización

Necesitamos de un instrumento que nos permita “probar” distintas acciones y saber de antemano cuál será su efecto en la salinidad futura del agua subterránea en sus distintos niveles, y hasta dónde cada medida particular o conjunto de medidas resultarán suficientes como para que el sistema se torne sostenible. Entendemos por un sistema sostenible, aquel en que los niveles de salinidad del agua se puedan estabilizar en valores tales que permitan un exitoso desarrollo de las actividades humanas en el presente y en el futuro. Las actividades que merecen particular atención son la provisión de agua potable y el riego.

Este trabajo será llevado a cabo por el CRA, que ya ha relevado el área de restricción de manera integral y que actualmente se encuentra abocado a identificar el estado de los acuíferos. Con esta información, el CRA podrá desarrollar modelos de cantidad y calidad del agua subterránea que permitan establecer lo que sucederá en el futuro sobre la base de las decisiones tomadas en el presente.

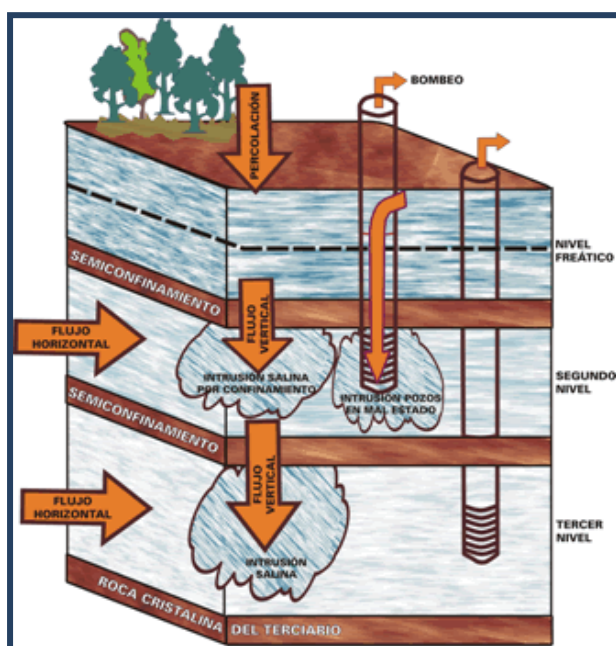
Pero mientras esperamos que se complete ese trabajo, que muy probablemente requerirá un par de años más, avanzamos en esta sección para establecer un modelo muy simple pero que nos dará una idea acerca del sentido en que se moverá la variable básica que nos interesa: la salinidad de los niveles medio e inferior del acuífero en la zona crítica. Asociado a esto, podremos evaluar económicamente las distintas alternativas.

En esta sección desarrollamos sucintamente este modelo y anticipamos algunas de sus implicancias.

i) Descripción del modelo

La estructura del modelo aproxima lo presentado esquemáticamente en la Figura 21. En ella puede observarse un nodo, que en este caso coincide con el área del relevamiento de aproximadamente 14.000 ha, al cual se ha hecho referencia más detallada en el capítulo anterior.

En esta Figura pueden apreciarse los tres niveles del acuífero: el nivel freático, el segundo y el tercer y último nivel de explotación. Los niveles se encuentran separados por semiconfinamientos y atravesados por bombas de distinta profundidad, que explotan el segundo y el tercer nivel. El dibujo muestra el bombeo de los pozos y destaca la percolación del agua que ocurre desde el nivel freático al



segundo nivel y de éste al tercer nivel a través de los semiconfinamientos o a través de pozos en mal estado. La intrusión salina ocurre desde el nivel freático al segundo nivel en una primera instancia y, cuando el segundo nivel tiene suficiente salinidad, se inicia el proceso de intrusión desde este hacia el tercer nivel de explotación. El basamento del sistema es roca cristalina del terciario.

A continuación se presenta más formalmente la estructura del modelo, que representa exactamente lo descrito para la Figura 21.

Figura 21. Representación esquemática del funcionamiento del sistema de agua subterránea

ii) Formalización del modelo

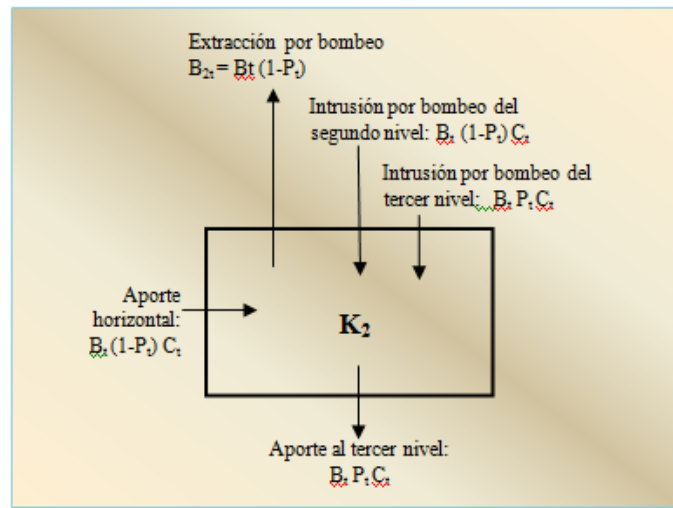
El componente hidrogeoquímico del modelo es el siguiente:

- S_{it} salinidad del nivel acuífero i en el año t , donde $i = 1$ es el nivel freático, $i = 2$ es el segundo nivel e $i = 3$ es el tercer nivel. El valor $t = 0$ indica las condiciones iniciales para cada nivel.
- P_t proporción de agua extraída desde el tercer nivel, de manera tal que $(1-P_t)$ es el agua bombeada desde el segundo nivel.
- C_t coeficiente que indica la proporción de agua que ingresa al segundo nivel desde el freático, por donde se produce la intrusión salina. En consecuencia $(1-C_t)$ es la proporción de agua que ingresa como aporte horizontal. Se supone que C_t es también la proporción del aporte vertical del segundo al tercer nivel.
- B_t volumen total bombeado en el año t
- B_{it} volumen extraído por bombeo del nivel i ; $i = 2, 3$. No se utiliza el nivel freático.
- K_{it} stock de agua subterránea en el nivel i , $i = 2, 3$. Se entiende para todos los fines prácticos que K_{2t} y K_{3t} son constantes en el tiempo ya que son niveles totalmente saturados y se supone ausencia de subsidencia. El nivel freático presenta el stock variable, ya que presenta variaciones en su nivel. No obstante esto no es relevante para este modelo.
- SH_{it} salinidad del agua del nivel i ($i = 2, 3$) que ingresa horizontalmente al área bajo estudio durante el período t .

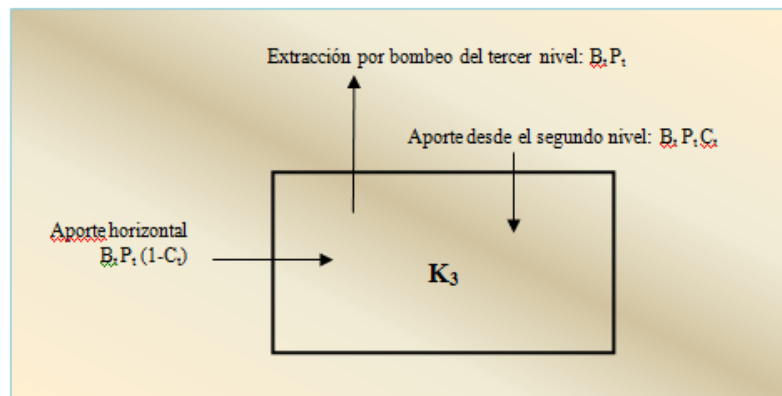
El coeficiente C_t , evaluado para un amplio conjunto de escenarios alternativos, se ubica entre 0,59 y 0,83 (Llop, 1997) y se lo utiliza en su nivel de base, que es 0,705 para las corridas del modelo que se presentan en este documento.

El modelo supone que toda el agua extraída desde el tercer nivel es sustituida naturalmente (por ser un acuífero confinado) por agua proveniente desde el segundo nivel a través de: a) confinamiento semipermeable y pozos en mal estado en la proporción C_t , y b) ingreso horizontal desde el mismo tercer nivel en la proporción $(1 - C_t)$

El esquema del flujo del segundo nivel es el siguiente:



Para el tercer nivel, los flujos de agua son:



El modelo lo que hace es calcular la salinidad para cada nivel y cada período como una simple regla de mezcla que contabiliza cuánta sal se extrae por bombeo, y cuánta ingresa vertical y horizontalmente. El nivel de salinidad del tercer nivel, S_{3t} , por ejemplo, varía de período en período utilizando los niveles de salinidad del período anterior de cada fuente, y utilizando una regla de mezcla simple. Esto es:

$$S_{3t} = (S_{3t-1} K_3 - B_t P_t S_{3t-1} + B_t P_t S_{2t-1} + SH_{3t-1} B_t P_t) / K_3$$

La salinidad en el tercer nivel en período t es igual al total de sales existentes en el período anterior ($S_{3t-1} K_3$) menos la cantidad extraída por bombeo más las ingresadas desde el segundo nivel más la aportada horizontalmente y todo dividido por K_3 para expresar la variable como concentración. Esta es una ecuación según la cual el nivel de salinidad en cada período se determina recursivamente mediante una regla de mezcla.

Para cada escenario futuro que se considere, las ecuaciones para el segundo y tercer nivel determinan las trayectorias futuras de los niveles de salinidad. Con esta información se pueden obtener los beneficios (o costos) actuales de cada acción sobre el sistema y verificar la sostenibilidad del sistema según los niveles de salinidad alcanzados en el largo plazo.

Para el logro de los objetivos mencionados se procedió a la elaboración de un modelo de simulación simple, agregado para el área crítica determinada en la que se realizó el relevamiento, que intenta representar los principales flujos de agua subterránea conocidos y, asociado a ellos, la evolución futura de la salinidad del agua subterránea en los dos niveles acuíferos relevantes.

iii) Resultados

Los resultados provienen de la comparación entre corridas alternativas del modelo de simulación que se realizan bajo diferentes escenarios. Para el cálculo del valor actual de los beneficios netos (VAB) se presentan dos escenarios: “con proyecto” y “sin proyecto”. La diferencia entre el VAB considerando una acción o proyecto para el manejo de la salinización y el VAB para el caso “sin proyecto” es el valor actual de los beneficios logrados mediante la acción o proyecto bajo consideración. Este es el valor relevante.

El primer escenario “sin proyecto” es el que se consigna en la Tabla 5 a continuación.

Variable o coeficiente	Valor
Coeficiente salinidad del suelo/-salinidad del agua	1,5
Proporción de intrusión freática	0,705
C. E. Inicial en el nivel medio	1672,5
C. E. Inicial del tercer nivel	1000
C. E. del aporte horizontal	1300
C. E. inicial del nivel freático	4500
Tasa aumento de la C.E. del nivel freático ($\mu\text{mho/año}$)	0
C. E. del nivel medio en el largo plazo	3556
Ha regadas por pozo	35
Extracción de agua por pozo ($\text{hm}^3/\text{año}$)	0,35
Superficie del área estudiada (hm^2)	14000
Espesor del acuífero medio (hm)	0,8
Espesor del acuífero profundo (hm)	1
Coeficiente de almacenamiento	0,05
Volumen de agua en el acuífero medio	560
Volumen de agua en el acuífero profundo	700
Extracciones por año (hm^3)	98,35
Proporción inicial bombeo 3er nivel	0,5
Tasa aumento bombeo 3er Nivel	0

Tabla 5. Variables y coeficientes utilizados en el modelo

Se considera el área relevada en la encuesta descrita en la Sección 9.a. que comprende un total de 14.000 ha, de las que unas 8.500 ha están cultivadas. Esta área es crítica por presentar el problema de salinización del agua subterránea con las mayores tasas de incremento y coincide con importantes áreas sin derecho de riego con aguas superficiales –riego con fuente subterránea exclusiva- y con uso complementario de agua subterránea.

Si bien este modelo puede ser utilizado para una amplia gama de acciones o proyectos alternativos y cualquier combinación entre ellos, a continuación se menciona el resultado para unos pocos casos de relevancia. En todos los casos se reportan tres valores para cada corrida del modelo: el valor actual de los beneficios (VAB) descontado al 12% (tasa que castiga a los beneficios de largo plazo), y la conductividad eléctrica (C.E.) alcanzada en el largo plazo para el segundo y tercer nivel de explotación, respectivamente. Estos últimos valores son los que, más allá de los resultados económicos, señalan la posibilidad o no de lograr la sustentabilidad del sistema.

En la Figura 22 se presenta el flujo de ingresos totales para el área estudiada suponiendo que el fenómeno de salinización es reversible, que se asignan al área 50 hm³/año y que la eficiencia de riego aumenta un 20%.

Los principales resultados son:

En el primer escenario base, si no hay aumentos en la salinidad del nivel freático –lo que es poco razonable–, se alcanzan en el largo plazo los niveles de C.E. de 3.964 y 3.165 para el segundo y tercer nivel, respectivamente. No hay resultado económico porque esta es la base de comparación.

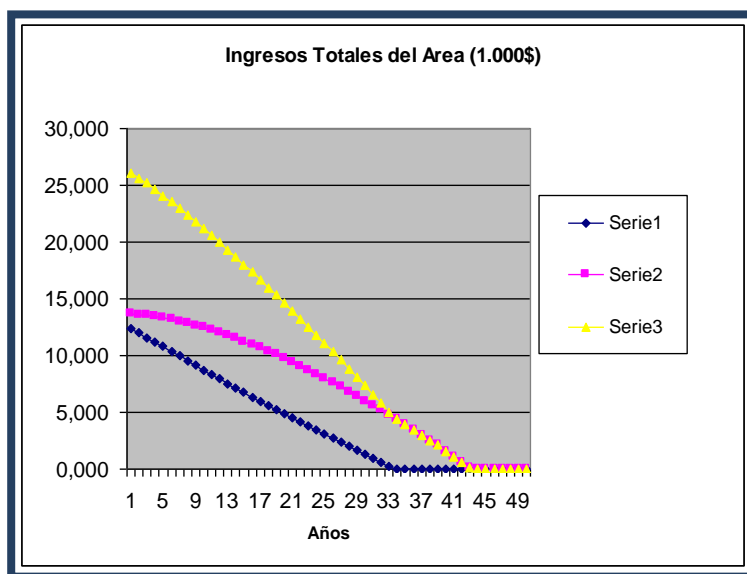


Figura 22. Ingresos totales del area (1.000\$)

Si en este escenario se trasvasan al área 13,73 hm³ de agua (factible con excedentes del Río Mendoza), se logra un VAB de \$5,29 millones de pesos, y valores de C.E. de 3.946 y 3.163 para los niveles segundo y tercero, respectivamente.

Si en el mismo escenario el trasvase se eleva a 50 hm³ anuales, factible de realizar por varias fuentes alternativas, el VAB asciende a \$22,82 millones, y los niveles de C.E. de largo plazo para el segundo y tercer nivel resultan de 3.946 y 3.100 respectivamente.

Si en vez de la importación de agua se considera un aumento de la eficiencia de uso del agua subterránea del 20%, se logran valores de \$7,78 millones de pesos de VAB y C.E. de 3.946 y 3.161 para el segundo y tercer nivel, respectivamente.

Asociando el aumento de eficiencia del 20% a la importación de 50 hm³/año, se alcanza un VAB de \$35,36 millones, y niveles de C.E. de 3.932 y 2.835 para los niveles segundo y tercero, respectivamente. Estos guarismos ya indican un interesante grado de sostenibilidad del sistema.

Considerando un escenario base más razonable, en el que la C.E. del nivel freático ascienda a 50 micromhos/año hasta estabilizarse en 8.000 micromhos/año, se produce una pérdida de \$7,85 millones en términos de valor actual. En este caso los niveles de C.E. para el segundo y tercer nivel ascienden a 6.841 y 5.174, respectivamente, valores que indican el fracaso de las posibilidades de lograr la sustentabilidad del sistema y determinan una desertificación del área.

Si sobre este segundo escenario de salinidad del freático se aplica la importación de 50 hm³/año, se alcanza un VAB de \$25,83 millones y niveles de salinidad (C.E.) de 6.819 y 4.843, respectivamente. Es un escenario no sostenible.

Si además del trasvase se considera una mejora de 20% en la eficiencia de riego, se logra un VAB de \$40,02 millones y niveles de C.E. de largo plazo de 6.693 y 4.129, respectivamente, para los niveles segundo y tercero. Tampoco luce sostenible.

Si, en el escenario indicado en 8, se coloca un techo a la salinidad del nivel freático –lo que puede lograrse mediante sistemas de drenaje apropiados- de 5.000 micromhos, se alcanza un VAB de \$40,96 millones de pesos y salinidades de 4.342 y 3.070 micromhos en los niveles dos y tres, respectivamente.

Si, en el caso anterior, el techo se establece a 4.000 micromhos, los valores alcanzados son de \$46,79 millones de pesos y la salinidad alcanzada por los niveles segundo y tercero alcanzarán los 3.521 y 2.595 micromhos, respectivamente.

Si se mantiene un techo de 4.000 micromhos en el nivel freático pero se eliminan la importación del agua y el aumento en la eficiencia de riego, se logra un VAB de \$16,56 millones y niveles de C.E. de largo plazo de 3.533 y 2873 micromhos, respectivamente, para los niveles segundo y tercero.

Surge del modelo y de las corridas realizadas la necesidad de incursionar en la identificación de los determinantes de la intrusión de agua freática, tales como la incidencia del volumen bombeado total

y la estacionalidad del mismo. También se concluye que hay que prestar particular atención al drenaje de aguas lixiviadas. Esto es, la disposición de las mismas fuera del área afectada por el problema de salinización del acuífero.

11. Síntesis final de los impactos de la salinización

Los procesos descritos han tenido y tendrán varios impactos. En primer lugar, como ya se mencionó, ante la salinización del nivel medio del sistema acuífero, una alta proporción de propiedades sin derecho de riego superficial han profundizado sus perforaciones para acceder a la mejor calidad del tercer nivel. Esto evidencia una sostenida demanda de agua de calidad apropiada para el riego y es un método indirecto para estimar cuánto está dispuesto a pagar el productor para obtener agua de buena calidad.

Asociado al impacto mencionado, el inicio de un proceso de degradación semejante en el tercer nivel implica que, en el largo plazo (o mediano, dependiendo de la velocidad del proceso), se produzca la pérdida total de la capacidad del acuífero como reservorio útil con fines de riego, agua potable y otros usos. Conviene recordar que el agua subterránea en el este mendocino es la única fuente de agua potable.

La salinización del agua de riego implica una creciente salinidad del suelo, lo que produce caídas en el rendimiento de los productos agrícolas. Por sobre determinados umbrales de salinidad del suelo se deben abandonar los cultivos más sensibles, reduciéndose cada vez más la frontera productiva.

Los impactos económicos asociados están dados principalmente por la caída del valor de la tierra, lo que significa una pérdida de activos por parte de los propietarios, y por el empobrecimiento de la población rural determinado por la caída de ingresos en el sector agrícola. Las poblaciones del este de Mendoza enfrentarán costos crecientes por la provisión de agua potable cada vez de menor calidad.

El impacto social es multidimensional: empobrecimiento rural, migración a zonas urbanas con los consiguientes aumentos en el costo de los servicios o pérdida de la calidad de los mismos, aumento en la marginalidad, criminalidad, etc. En síntesis, pérdidas de calidad de vida.

Ambientalmente, no quedan dudas que estamos en presencia de un importante proceso de desertificación por salinización de las fuentes de agua. Lo contrario a los objetivos de un desarrollo sostenible.

Las implicancias de estas conclusiones son considerables en términos de política hídrica. Para controlar la salinización de agua subterránea en el este mendocino, tanto en sus niveles segundo como tercero, se deben enfatizar las acciones tendientes a reducir la sobreexplotación. Entre otras, estas

medidas pueden ser: a) reducir la demanda de agua, ya sea por cambio de cultivos o por adopción de tecnologías ahorradoras de agua; b) revisar las concesiones de agua superficial, de manera de poder reasignar agua de tal fuente a la zona; c) como una variante mitigada del punto anterior, asignar a la zona aguas excedentes de verano; actualmente, tales excedentes se asignan a áreas ya atendidas, traduciéndose en la mayoría de los casos en ineficiencias, d) conducir a la zona crítica agua subterránea alumbra en áreas donde el acuífero es muy productivo y no resulta vulnerable; y e) estudiar las maneras costo efectivas de implementar sistemas de drenaje o purga de las aguas freáticas a fin de establecer un techo a la salinidad del primer nivel, una de las principales determinantes de los procesos de salinización.

12. Referencias y Bibliografía

- ALVAREZ, A. (1984). Evaluación hidroquímica del recurso hídrico de la zona Norte de la provincia de Mendoza, p. 271 – CRAS.
- ALVAREZ, A. (1989). Control de la calidad y contaminación del agua subterránea de la zona Norte y Centro de la provincia de Mendoza. T. 112 – CRAS.
- DEPARTAMENTO General de Irrigación. (2000). Política de Aguas Subterráneas. Mendoza, Argentina.
- FASCIOLO, G. y A. Llop. (1997). Encuesta a productores rurales en el área afectada por la salinización del acuífero. San Martín, Mendoza. INA, CELAA. Mendoza.
- HERNÁNDEZ, J. (1982). Infiltración en la red secundaria del río Mendoza. Síntesis del trabajo. D.39 – CRAS.
- HERNÁNDEZ, J. (1984). Río Mendoza. Infiltración en el tramo Cacheuta – Cipolletti. Provincia de Mendoza. D. 87 – CRAS.
- HERNÁNDEZ, J.; Poblete, M.; Pereyra, M.; Alvarez, A.; Martinís, N. (1984). Localización de zonas aptas para la construcción de baterías de pozos. Zona Norte, Provincia de Mendoza. D.108 – CRAS.
- LLOP, A. (1997). Determinantes de la salinización del agua subterránea en el Este mendocino. Trabajo presentado en el Departamento General de Irrigación como base para un taller sobre la temática. Mendoza, Argentina.
- LLOP, A. (2000). Economía del manejo de la calidad del agua subterránea en el este mendocino. Trabajo publicado en Anales del XVIII Congreso Nacional del Agua, Santiago del Estero, Argentina.
- LLOP, A. y G. Fasciolo. (1998). Estrategias de control de la contaminación del agua subterránea: el caso del Este mendocino. Trabajo publicado en Anales del XVII Congreso Nacional del Agua y II Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur. Santa Fe, Argentina, pgs. 54 a 63. Santa Fe, Argentina.
- MASS, E.V y G.J. Hoffman. (1976). Crop salt tolerance: evaluation of existin-data. En: Managing Saline Water for Irrigation. Proceedings University. Lubbock. Texas. Agosto de 1976.
- ORTIZ, A; Zambrano, J. (1975). Investigación geológica e hidrogeológica del área Mendoza Norte. P. 94 – CRAS.

PAZOS, J.; Bartolomeo, J.; Ortíz, O.; Herrada, H. (1988). Evaluación del estado hidrológico de la zona norte de Mendoza. Año 1987. Provincia de Mendoza. DI – 116 – CRAS.

ROBLES, J; Alvarez, A. (1991). Estado de perforaciones zona Norte. Departamentos San Martín, Junín y Rivadavia, Provincia de Mendoza. DI – 171 – CRAS.

ANEXO I

¿Cuánta salinización por los pozos y cuánta por el semiconfinamiento?

Introducción

Existe evidencia de que el proceso de salinización del nivel medio del agua subterránea en el este de Mendoza se está extendiendo y ha comenzado a afectar al tercer nivel debido a la intensificación de su explotación. Es muy conocido el hecho de que muchos usuarios de agua subterránea que bombeaban del segundo nivel, al encontrarse con niveles crecientes de salinidad, han profundizado sus pozos o efectuado nuevas perforaciones para obtener agua de mejor calidad del tercer nivel.

Se mencionó en el texto que el proceso de salinización está causado simultáneamente por dos fenómenos. Por un lado, existe una gran cantidad de pozos rotos o mal construidos, que se encuentran perforados, rotos, en mal estado o mal cementados, que facilitan la intrusión salina del nivel freático a los niveles más profundos. El CRAS ha estimado que más del 30% de los pozos se encuentran en malas condiciones. El otro fenómeno determinante de la intrusión salina se debe a la diferencia de presión entre el nivel freático y el nivel medio, que produce la intrusión salina a través del semiconfinamiento que las separa. El objeto de este Anexo es estimar el aporte relativo de estas dos fuentes de salinización.

Presentación conceptual del método de cálculo

Se desarrolló un modelo simple que permite estimar el volumen de intrusión salina desde el freático y que es necesario para explicar la tasa de salinización correspondiente al nivel medio a lo largo de la década 1981-1991, años para los que existe información producida por el CRA. Para ello se calcula una simple regla de mezcla, según los siguientes pasos:

- Se comienza por considerar la salinidad media en el área crítica para los períodos para los cuales existe información. La salinidad media del segundo nivel ascendía a 1.672 mhos en el año 1981 y en el año 1991 alcanza 3.170 mhos. La estimación del volumen considera al área muestral que se presenta en la Sección 9 de este documento como un "nodo" hidrogeológico, que tiene por superficie al área encuestada de aproximadamente 14.000 ha. La profundidad es la del nivel medio, que se considera de 80 m, dotada por un coeficiente de almacenamiento de agua del 5%.
- Adicionalmente, se calcula la cantidad de agua bombeada anualmente desde el acuífero. Este cálculo se basa en los datos de la encuesta, considerando la cantidad de perforaciones en uso

para riego agrícola, la cantidad media de ha que se riegan con cada perforación, y la evapotranspiración de los cultivos dominantes en el área regada.

- Con los elementos definidos, ahora debemos buscar la manera de explicar el aumento en la salinidad media del acuífero medida por el CRAS. El modelo es muy simple y hace las siguientes operaciones: del stock de agua existente en el nivel medio, cada año se extrae el volumen bombeado y se incorpora el volumen de agua que entra desde el freático (F) y la que lo hace como aporte horizontal (H) en una proporción dada. Se sabe que el volumen extraído es igual al que ingresa a nuestro nodo. Por regla de mezcla, se calcula la nueva salinidad que tendrá vigencia el próximo período.
- Este ejercicio se repite año tras año desde 1981 hasta 1991. Aquella proporción entre el agua freática y la del aporte horizontal que dé como resultado final la salinidad observada en 1991, partiendo del valor inicial de 1981, es el valor buscado. Este es el que permite conocer el volumen de intrusión salina desde el freático.
- Conocido el volumen de agua que se incorporaría según el proceso descrito, se estima el caudal que debería ingresar a través de cada pozo defectuoso, valor que se analiza basándose en su razonabilidad.

Los resultados están orientados a identificar: a) hasta dónde es factible que la salinización observada en el agua subterránea sea solamente consecuencia de los pozos en mal estado, y b) si no es así, tratar de aproximar cuantitativamente su contribución en relación con el aporte realizado por el proceso de intrusión a través del semiconfinamiento.

Conclusiones

Los resultados indican que la proporción de agua que ingresa al nivel medio desde el nivel freático oscila alrededor del 70% del total. Esto está asociado a un volumen de intrusión del orden de los 58 hm³ por año. Este es el primer dato importante que deseábamos conseguir.

Interesa ahora saber cuál es el volumen de agua freática (o caudal) que debería entrar por cada pozo para completar el monto arriba estimado. Bajo condiciones razonables de bombeo, esto equivale a 183 m³/hora por pozo en malas condiciones, lo que es claramente una exageración. Cuando se habla de más de 135 m³ por hora, se está hablando de un pozo con una muy buena producción, alta potencia, alta eficiencia y buenas condiciones de la productividad del acuífero.

Resulta entonces importante contrastar estos valores con aquellos que pueden calcularse sobre la base de las experiencias realizadas por el CRAS, orientadas a la identificación del tipo y naturaleza de rotura en los pozos en sus ensayos seriados. Los pozos con problemas normalmente comienzan arro-

jando un alto nivel de conductividad eléctrica, respondiendo al agua freática que se ha introducido en la tubería y en la zona circundante a los filtros. El nivel de salinidad continúa por un largo tiempo en la medida que el pozo extrae el agua que se incorpora desde el nivel freático al nivel inferior. Una vez extraída esta "burbuja" de agua salina, el nivel comienza a reducirse hasta que converge en un estado estable. Si este estado estable coincide con el valor de salinidad del acuífero, esto indica que el pozo está roto en su parte superior (nivel freático) o que hay intrusión debido a una mala cementación.

Si se analiza la diversidad de ensayos salinidad-tiempo realizados por el CRAS, puede decirse que cuando la convergencia en condiciones de estado estable ocurre en un lapso no mayor de 3 horas luego de 7 días sin bombeo, se trata de un caso grave. Haciendo sobre este caso un cálculo simple, puede razonarse que si la bomba extrae el grueso del agua salina incorporada por intrusión en tres horas a un caudal de 150 m^3 por hora, el volumen de intrusión ocurrido en una semana tiene que haber sido del orden de los 450 m^3 . Esto equivale a un caudal de $2,68 \text{ m}^3$ por hora de intrusión. Este caudal resulta casi 70 veces inferior al valor arriba estimado.

Resulta entonces inadmisibles suponer que la salinización del nivel medio ocurre exclusivamente por los pozos en malas condiciones. Por lo tanto, se debe concluir que el principal aporte de sales al nivel medio ocurre por intrusión a través del semiconfinamiento.

Si se piensa que el caso tipo arriba presentado para calcular el volumen de intrusión por bomba de acuerdo con las experiencias del CRAS implica una subestimación, aun suponiendo que tal volumen de intrusión por pozo sea 5 veces el mencionado, el aporte de la salinización del acuífero por pozos rotos representaría a lo sumo el 10% de la salinización total.

ANEXO II

Ley de aguas subterráneas N° 4035, de 1974

Para el usuario del agua subterránea resulta de interés conocer la Ley 4035, que rige a las aguas subterráneas de la provincia. A continuación, se presentan los aspectos de la ley relevantes para el operador del recurso.

- Según el artículo 1, la investigación, exploración, uso, control, recarga, conservación, desarrollo y aprovechamiento de las aguas subterráneas para cuya extracción sea necesaria la construcción de obras, se rigen por esta ley de aguas subterráneas y las reglamentaciones que en su marco se dicten.
- Se define como uso común del agua subterránea la situación en que la misma se destine exclusivamente a satisfacer necesidades domésticas del usuario. Este uso es controlado y reglamentado por el D.G.I. Los usos especiales que implican el abastecimiento poblaciones, uso agrícola, ganadero, industrial, minero, para la recreación y turismo y con fines termales o medicinales, solo pueden adquirirse mediante concesión otorgada por el D.G.I.
- La ley establece en su artículo 5 que las concesiones se entenderán otorgadas sin perjuicio de terceros, y estarán siempre sujetas a la existencia de caudales.

El artículo 7 indica las preferencias con relación al sujeto solicitante de la concesión. Se da preferencia a aquellas que sean presentadas por personas jurídicas públicas, las que comprenden las inspecciones de cauce. Le siguen en preferencia los consorcios, asociaciones o cooperativas, y luego las personas físicas o jurídicas de naturaleza privada.

Para obtener la autorización para perforar y la concesión, debe llenarse una serie de requisitos formales (nombre de los solicitantes, título del dominio, plano de mensura, etc.). Una vez realizado esto la solicitud debe publicarse en el Boletín Oficial con el fin de dar lugar a interceder a quienes puedan sentirse afectados.

Cumplidas las formalidades, el D.G.I. producirá un informe oficial que establezca:

Que el caudal factible de ser extraído no perjudique a terceros en calidad, capacidad o disponibilidad de la fuente.

Que no disminuirá o agotará el caudal medio requerido por las explotaciones anteriores o prioritarias y que no causará perjuicio sensible a las mismas.

Que al realizarse la obra se haya previsto la aplicación de dispositivos para la medición del caudal a erogarse.

Que el volumen estimado resulte suficiente para satisfacer las necesidades de uso a que se destine y que responda a un plan de utilización racional.

Con estos informes, el D.G.I. otorgará o rechazará por resolución fundada el permiso para perforar. Una vez otorgado el permiso, puede haber condiciones que determinen su revocación.

Dentro de los derechos del concesionario figuran el utilizar las aguas de acuerdo con los términos de la concesión de tal ley y solicitar y obtener información técnica relativa al agua subterránea por parte de la administración.

Dentro de las obligaciones se encuentran el utilizar racional y eficientemente el caudal concedido de acuerdo con lo que establece la ley, abonar la carga financiera de la concesión, suministrar la información que le sea solicitada por la administración, comunicar cualquier alteración física o química que se produzca en la perforación o en el agua extraída, y permitir la realización de inspecciones técnicas. Se encuentran prohibidos aspectos tales como extraer un mayor caudal del máximo autorizado.

La administración tiene una serie de facultades para regular el uso y prever el agotamiento de la fuente. En este sentido puede establecer turnos, restringir, limitar o regular el uso o la extracción del agua subterránea cuando a causa de ello se pueda alterar el balance hidrológico del acuífero, ya sea por descenso de niveles (sobreexplotación) o desmejoramiento de la calidad del agua. Puede establecer zonas de protección alrededor de la perforación y también gestionar la declaración de agotamiento de la fuente cuando su disponibilidad se encuentre totalmente comprometida con las concesiones otorgadas. En este caso no se admiten nuevas solicitudes de aprovechamiento y se delimitarán las zonas de reserva.

La ley establece un registro general de perforaciones, en donde se inscriben la totalidad de los permisos y concesiones para el uso de agua subterránea en la provincia. De igual manera, se establece la vigencia de un registro de directores y constructores de perforaciones.

La concesión puede extinguirse por renuncia, vencimiento del plazo, revocatoria, caducidad, agotamiento de la fuente de provisión o pérdida de la aptitud para la finalidad a la que fuera concedida.

ANEXO III

Aspectos centrales del reglamento técnico de perforaciones y registro de directores técnicos y empresas constructoras de perforaciones

Este reglamento se establece según Resolución Nº 229 del H. Tribunal Administrativo del D.G.I., del 17 de junio de 1994. En él se establecen los siguientes títulos:

Título 1: Registro de directores y de constructores de perforaciones.

Título 2: De los directores y de los constructores de perforaciones

Título 3: Normas técnicas de ejecución de las perforaciones.

Los primeros dos títulos exigen la creación de un registro de directores y de constructores, de manera tal que solo los que allí figuren estarán en condiciones formales para realizar las labores. Determinan además los requisitos que deben satisfacer estos operadores y las responsabilidades que les compete en la realización de los trabajos.

Conviene recordar en este punto que según los estudios realizados por el CRA (ex CRAS), la mayoría de las perforaciones con roturas y problemas de funcionamiento existentes, han sido preponderantemente las construidas por unas pocas empresas que evidentemente hicieron un mal trabajo. En este sentido, se recomienda a aquellos usuarios de agua que están dispuestos a invertir en nuevas perforaciones que tengan un particular cuidado en la selección de la empresa que realizará el trabajo.

A continuación se presenta un listado de las normas técnicas requeridas para la ejecución de las perforaciones.

En primer lugar (artículo 17) se establece la necesidad de impedir la existencia de conexión permanente entre la superficie del suelo y los distintos acuíferos, estableciendo la obligatoriedad de cementar las perforaciones a la altura de las estratificaciones críticas. Asimismo, establece el compromiso de que los materiales a utilizar sean nuevos, admitiéndose material usado si este ha sido ensayado y probado por organismos oficiales.

Luego de establecer las especificaciones técnicas básicas, se hace referencia a los siguientes puntos:

- Sistema de perforación
- Explotación: se establece la necesidad de muestrear el suelo durante la perforación.

- Perfilaje eléctrico
- Entubaciones: se establece la naturaleza de las cañerías a ser utilizadas, tanto para el sistema de percusión o el rotativo, norma la colocación de centralizadores, características de los filtros, grava a utilizar asociada a los mismos, etc.
- Naturaleza de las juntas de cañería
- Tipo de reducciones
- Exigencias relativas a zapatos, tapón de fondo y aislaciones.
- Cementación: este es un tema crítico normado en detalle y cuyos procedimientos deben ser inspeccionados.
- Limpieza de filtros y tubería
- Desarrollo del pozo
- Ensayos a realizar
- Características de los antepozos.

Finalmente, se establecen los procedimientos a realizar cuando se abandonan las perforaciones tanto en construcción como en explotación.