

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XVIII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

EFECTO DE LA RED DE CANALES Y SISTEMAS DE RIEGO EN LA HIDROGEOLOGÍA DEL VALLE DE PEUMO

José Luis Arumí R.¹
Diego Rivera S.²
Eduardo Holzapfel H.³

RESUMEN

El presente estudio analiza el efecto de la red de canales y sistemas de riego en la hidrología de un valle agrícola. El área de estudio es el Valle de Peumo, ubicado en la VI Región de Chile. Este valle posee características geomorfológicas y de infraestructura que facilitan la interacción entre los sistemas de aguas superficiales, subterráneas y de riego.

El efecto de esta interacción es la estabilidad de los niveles freáticos durante todo el año. En invierno, la red de canales, que no transporta agua, actúa como una red de drenes interceptores que desvía la escorrentía invernal, que en otro caso llegaría a las zonas planas y recargaría al acuífero. En verano, al transportar aguas, la infiltración desde los canales recarga el acuífero compensando las demandas de agua por evapotranspiración y flujo base.

La hidrología del valle es afectada por las prácticas agrícolas; por esa razón es importante entender de qué forma las decisiones de manejo, como el revestimiento de canales, pueden modificar el balance de aguas en el valle y su potencial productivo.

de la vulnerabilidad en el predio y entrega criterios para reducir el sesgo conservador del método BGR-DGA.

¹ *Ingeniero Civil, Ph.D., Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Campus Chillán. Casilla 537 Chillan, Chile. Correo electrónico: jarumi@udec.cl*

² *Ingeniero Civil, Dr., Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Campus Chillán. Casilla 537 Chillan, Chile. Correo electrónico: dirivera@udec.cl*

³ *Ingeniero Agrónomo, Ph. D., Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Campus Chillán. Casilla 537 Chillan, Chile. Correo electrónico: eholzapf@udec.cl*

INTRODUCCIÓN

En una zona de agricultura intensiva, los sistemas de agua superficial, aguas subterráneas y de transporte y distribución de aguas de riego, interactúan en forma compleja y dinámica. Esta interacción se manifiesta a través de la hidrología e hidráulica, la química y mineralogía, la vegetación, la mecánica y física de suelos y rocas, la geomorfología y los procesos de transporte y acumulación (Tóth, 1999), pudiendo producir ascensos en el nivel freático y afectando el manejo de los cultivos, la administración de los derechos de aprovechamiento de agua, la hidrología y la disponibilidad del recurso.

Tóth (1970; citado por Tóth, 1999) define el “ambiente hidrogeológico” como un marco conceptual en donde la topografía, la geología y el clima determinan los principales atributos del régimen de aguas subterráneas en una determinada área. Así, en un sistema hidrológico complejo, el patrón espacial y temporal del flujo de aguas establece una serie de restricciones que condicionan el potencial productivo de una zona a través de la interacción con el agua superficial y agua de riego. De esta manera, los sistemas de agua superficial y subterránea no deben ser vistos como recursos separados, sino como sistemas acoplados en tiempo y espacio que forman un “continuo hidrológico” (Winter et al., 1998).

En un valle agrícola regado con una extensa red de canales, se introducen como un nuevo continuo los sistemas de riego, que interactúan con el continuo hidrológico a través de fenómenos como la recarga del agua subterránea por la filtración desde canales (Khepar et al., 2000) o la infiltración desde los sistemas de riego (Taghavi et al., 1984).

Fernald (2002) evaluó el efecto de estas filtraciones en el balance hídrico en la zona regada del Río Grande (USA), mostrando que el riego no sólo actúa como una fuente de recarga, sino también como una nueva condición de borde que determina localmente los patrones de flujo y el tiempo de residencia en la zona vadosa de potenciales contaminantes. La distribución en el perfil de suelo de los contaminantes es dependiente del agua percolada y por lo tanto, de la operación y el manejo del sistema de riego.

En este contexto, se presenta un trabajo que se desarrolló entre los años 2003 y 2006 en el marco del Proyecto Fondef D02I-1146 “Tecnologías de manejo de agua para una agricultura sustentable” cuyo objetivo es el estudiar el impacto del manejo de los sistemas de conducción, distribución y aplicación del agua de riego en la hidrología superficial y subterránea en un valle con explotación agrícola intensiva.

EL VALLE DE PEUMO

El valle de Peumo (Figuras 1 y 2) concentra una importante actividad agrícola, orientada al mercado nacional y de exportación, que se encuentra ubicado en la zona central de Chile (Sexta Región, 34° Latitud Sur). Los cultivos corresponden principalmente a cítricos, paltos, vides y una industria vitivinícola que produce vinos de alta calidad.

En el valle de Peumo las precipitaciones se concentran durante los meses de invierno (mayo a agosto) con un promedio anual de 640 mm. Por otra parte, la evapotranspiración potencial anual es de 1200 mm., con máximos en los meses de diciembre, enero y febrero, que no presentan lluvias. Por ello, para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos, se ha construido

una red de canales en el pie de monte y en el valle que transporta agua captada del río Cachapoal y que es distribuida por todo el valle (Figura 3).

A escala predial, el agua es distribuida dentro de los huertos utilizando riego presurizado, sistemas de aducción de baja presión, riego por surcos o combinaciones de métodos de riego superficial. La aplicación de agua mediante métodos tecnificados, la planificación del riego, fertilización y manejo sustentable de los recursos, son algunos de los factores que explica el aumento de la productividad en el valle.

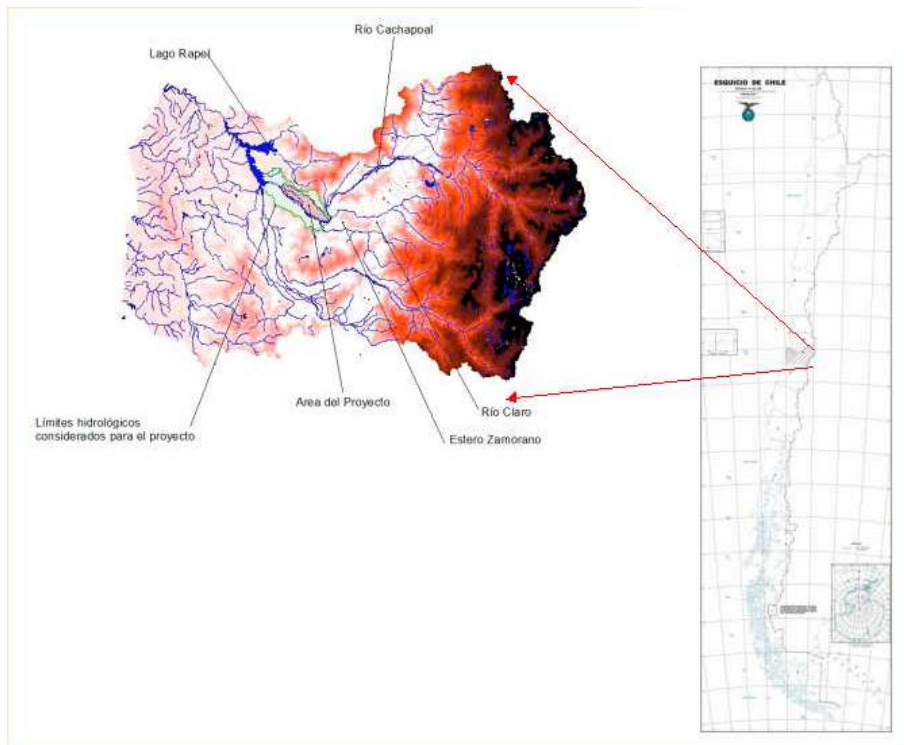


Figura 1. Ubicación del valle de Peumo y el área del proyecto FONDEF D02I-1146



Figura 2. Modelo Digital de Terreno del Valle de Peumo (Fuente Earth Google)

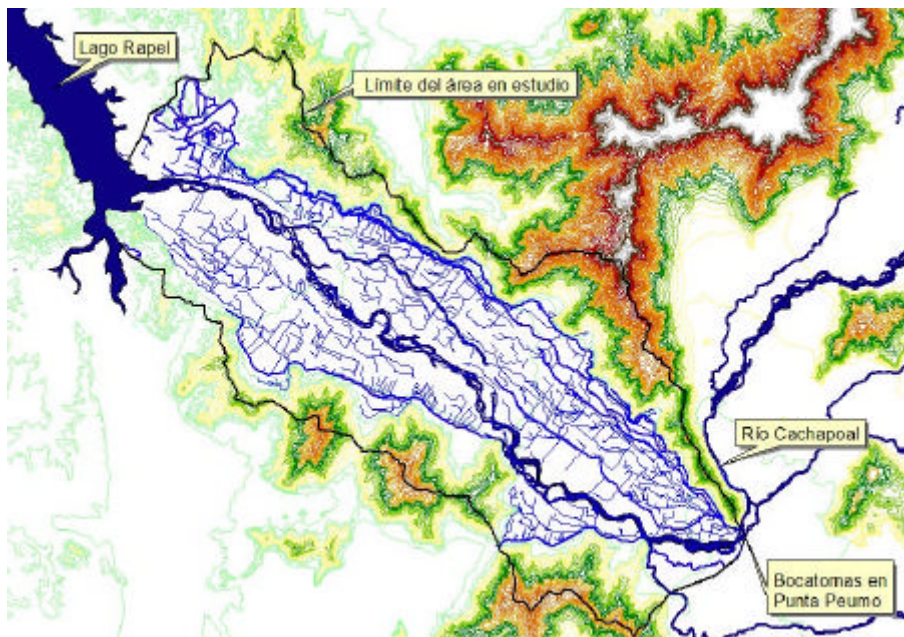


Figura 3. Red de canales en el Valle de Peumo.

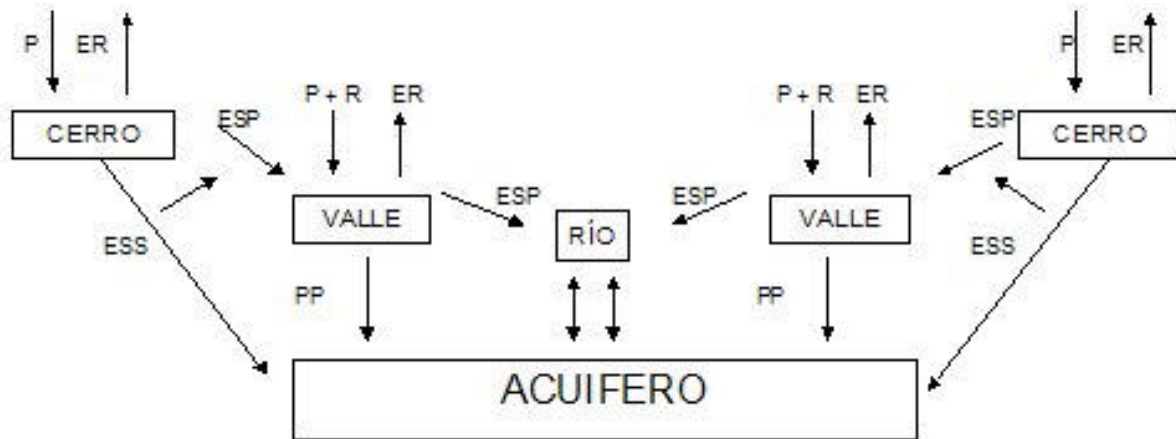


Figura 4. Esquema conceptual de la hidrología del Valle de Peumo. P: precipitación, ER: evapotranspiración, ESP: escorrentía superficial, ESS: escorrentía subsuperficial, PP Percolación Profunda, R: Riego

ZONIFICACIÓN HIDROLÓGICA

Considerando la geomorfología del valle y la red de drenaje existente se identificaron cuatro tipos de unidades hidrológicas: cerros, valle, río Cachapoal y la formación de aguas subterráneas. Las interrelaciones entre estas unidades se muestran en la Figura 4.

En el Valle (con una superficie de aproximadamente 16.000 ha.), se opera una red de canales de riego sin revestir (Figura 4) que capta entre $3,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (octubre) y $7,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (febrero) desde el río Cachapoal. Los canales principales atraviesan una zona de depósitos aluviales permeables que favorecen la interacción con las aguas subterráneas. Orrego (2003) muestra que en el valle se genera aproximadamente un 78 % de la recarga de las aguas subterráneas.

El sistema de aguas subterráneas está conformado por una serie de acuíferos superficiales, formados por rellenos gravo-arenosos del río Cachapoal con un espesor de aproximadamente 50 metros y una conductividad hidráulica estimada entre 100 a 150 m día^{-1} . Entre las cadenas montañosas que limitan el valle se presentan acuíferos de menor importancia formados por rellenos provenientes de los procesos erosivos de estas mismas montañas. (Figura 5).

Para cuencas de similares características hidrológicas al valle de Peumo, el proceso de recarga debería producirse por la generación de escorrentía superficial y subsuperficial en las zonas altas (cerros) de la cuenca, que descargan en las zonas bajas y planas. Dentro de este esquema, el río es una condición de borde importante que determina la aparición de zonas de amortiguación del flujo subterráneo y la extensión de la zona saturada, con niveles freáticos profundos en verano y someros, e incluso superficiales, en invierno. Para el valle en estudio, en invierno los canales, que no transportan agua, funcionan como drenes interceptores de la escorrentía superficial y subsuperficial, disminuyendo la recarga de las zonas bajas; en verano, las filtraciones desde los canales constituyen una fuente de recarga al acuífero, además de la percolación profunda debido al riego (Figura 6).

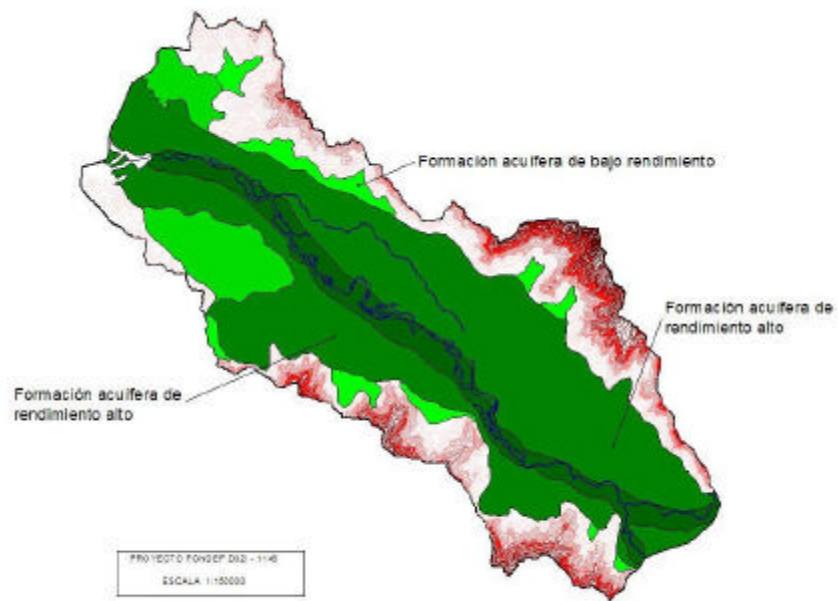


Figura 5. Esquema general de los tipos de formaciones acuíferas existentes en el valle de Peumo.

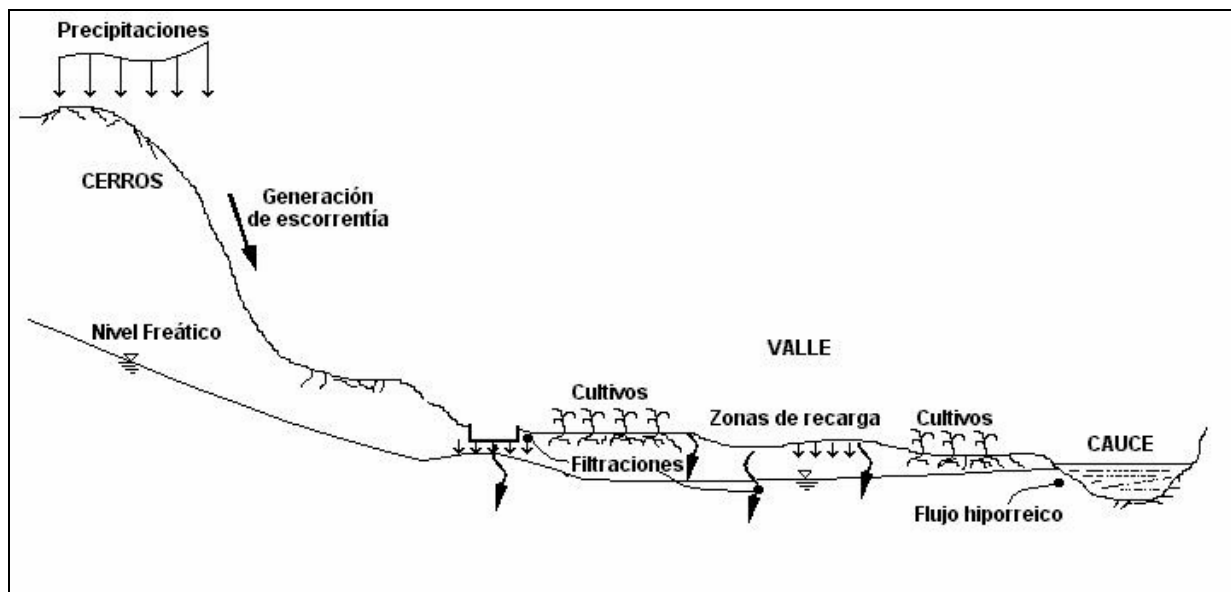


Figura 6. Situación actual en un corte transversal para el valle de Peumo.

A escala regional la interacción entre el agua subterránea y el río en su condición de altura constante genera zonas hiporreicas (zonas de intercambio de agua subterránea y superficial entre el acuífero y el cauce), verticales y laterales, donde los contaminantes aumentan su tiempo de residencia en la zona saturada y no saturada. Como la variabilidad espacial y temporal de las zonas hiporreicas está determinada por la variación en el gradiente hidráulico, y considerando que el nivel freático y el nivel del río son relativamente constantes, es posible señalar que estas zonas son estables en el tiempo y espacio, convirtiéndose en amortiguadores del flujo de agua y contaminantes desde las zonas agrícolas hacia los cuerpos de agua receptores.

SISTEMAS DE MONITOREO EN EL VALLE DE PEUMO

Con el objeto de estudiar la dinámica entre la hidrogeología y el manejo del agua y estudiar la influencia de la red de canales en el valle, se instalaron distintos sistemas de monitoreo en tres componentes del ecosistema: suelo, agua y cultivos. Los datos han sido colectados desde el año 2003, con mayor frecuencia durante la temporada de riego (septiembre a abril). El primer grupo de ensayos, a nivel local, considera la influencia de los sistemas de riego en el nivel freático dentro de un huerto y el segundo grupo, a escala del valle, considera el efecto de la red de canales en los niveles freáticos.

El instrumental de monitoreo para agua está orientado al conocimiento de la dinámica de las aguas subterráneas, a través de los niveles freáticos y al monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales. Se realizaron mediciones de nivel freático durante todo el año en 6 pozos de observación en áreas representativas de las características del valle, y niveles de agua para el río Cachapoal en la entrada y salida del valle. En dos unidades experimentales se instalaron además transductores de presión (TruTrack, WT-HR 200 Water Height Datalogger) con los cuales es posible obtener registros de nivel freático cada 1 hora. Para controlar la calidad del agua, se establecieron 20 puntos de control en los cuales se extrajeron muestras para análisis químicos y microbiológicos. Los puntos de control se ubicaron en el río Cachapoal, en los canales riego, drenes y esteros. La frecuencia de muestreo fue mensual y se controló pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitratos y coliformes fecales.

MODELO HIDROGEOLÓGICO

Para estudiar con mayor detalle el sistema hidrogeológico del valle de Peumo, se desarrolló un modelo hidrogeológico basado en el modelo conceptual descrito en la Figura 4. Sobre la base de este modelo, se realizó una subdivisión hidrológica del área de estudio para definir sectores con características similares que simplifiquen el estudio hidrológico y la aplicación de modelos. Para definir zonas homogéneas se consideró en primer lugar la topografía para determinar que zonas pertenecen al valle y cuales a las laderas de cerros. Además, se identificaron los cauces naturales (quebradas y esteros). La segunda etapa consistió en determinar si la clasificación de la hidrogeología corresponde a unidades de depósitos consolidados (rocas) o no consolidados (sedimentos). Finalmente se consideró la intercepción de canales, acequias, ríos y esteros.

En la Figura 7 se muestra el resultado de la zonificación hidrológica basada en los criterios descritos anteriormente. Se identificaron 18 zonas hidrológicas, de las cuales 8 corresponden a sectores de cerros, 9 a sectores de valle y una última a los cauces del Río Cachapoal y el Estero Taguilla. En la Tabla 1 se muestran las 18 zonas, clasificadas en cerro, valle y río, y la zona a la que aporta a través de la escorrentía superficial total.

Tabla 1. Zonificación hidrológica para el área de estudio

| ZONA | | AREA (há) | ZONA A LA QUE APORTA |
|------|-------|-----------|----------------------|
| 1 | Cerro | 1.409,0 | Zona 8 |
| 2 | Cerro | 414,9 | Zona 8 y Zona 18 |
| 3 | Cerro | 2.372,5 | Zona 9 |
| 4 | Cerro | 4.940,1 | Zona 13 y Zona 16 |
| 5 | Cerro | 1.683,2 | Zona 12 y Zona 13 |
| 6 | Cerro | 359,4 | Zona 18 |
| 7 | Valle | 249,1 | Zona 18 |
| 8 | Valle | 754,1 | Zona 18 |
| 9 | Valle | 2.401,3 | Zona 11 y Zona 18 |
| 10 | Cerro | 404,7 | Zona 11 |
| 11 | Valle | 2.672,4 | Zona 14 y Zona 18 |
| 12 | Valle | 639,2 | Zona 13 |
| 13 | Valle | 2.900,2 | Zona 18 |
| 14 | Cerro | 282,6 | Zona 18 |
| 15 | Valle | 1.371,4 | Zona 18 |
| 16 | Valle | 2.537,3 | Zona 13 y Zona 17 |
| 17 | Valle | 2.279,9 | Zona 15 y Zona 18 |
| 18 | Río | 3.314,3 | Embalse Rapel |

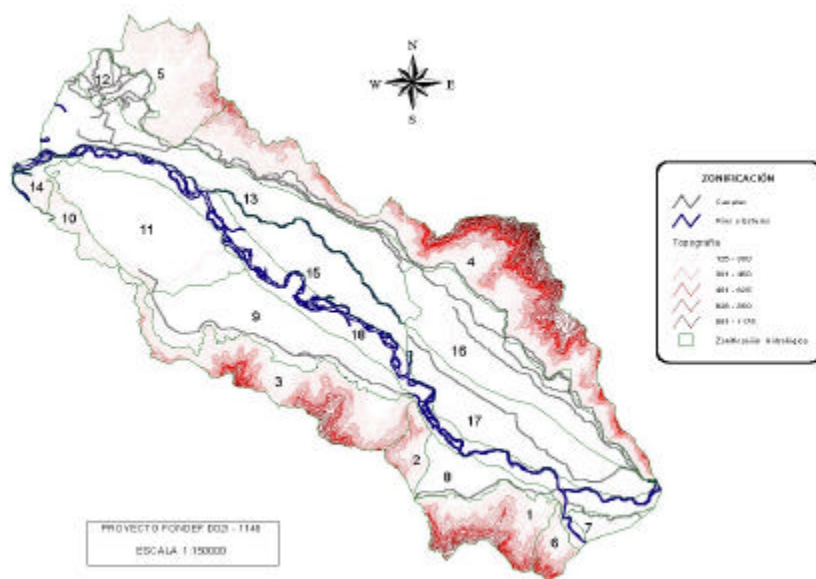


Figura 7. Zonificación hidrológica definida para el área en estudio.

Utilizando el programa Processing Modflow (Chiang y Kinzelbach, 1998), se construyó un modelo numérico para estudiar la hidrogeología del Valle de Peumo. Para ello se utilizó detallada información de la geología e hidrogeología local, proporcionada por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (www.conama.cl).

Para el desarrollo del modelo numérico de aguas subterráneas se decidió utilizar un sistema local de coordenadas rotado para facilitar la asignación de condiciones de borde (Figura 8). El modelo numérico de aguas subterráneas considera celdas de 10.000 m², con las siguientes condiciones de borde:

- Las cadenas de cerros ubicados al Norte y al Sur del Valle que definen su geometría y fuerzan la dirección general del escurrimiento (Figura 2).
- El río Cachapoal cruza desde Punta Peumo, donde bordea la cadena de cerros norte, hasta la confluencia del estero Zamorano donde alcanza la cadena de cerros sur, que cierra el valle en su extremo de aguas arriba.
- El lago, formado por la Central Hidroeléctrica Rapel (Figuras 1 y 2), recibe todas las aguas provenientes del Valle, por lo que puede ser considerado como una condición de borde del extremo aguas abajo.

El modelo de aguas subterráneas ha sido validado, mediante la verificación del balance hídrico y la comparación con las observaciones existentes. Sin embargo, a la fecha del presente informe no puede ser calibrado, puesto que no se dispone de suficientes datos de nivel freático.

De los resultados del modelo, se puede observar que el flujo de aguas subterráneas está fuertemente influenciado por la pendiente del Valle y que existen marcadas zonas de infiltración y exfiltración entre el río y el acuífero.

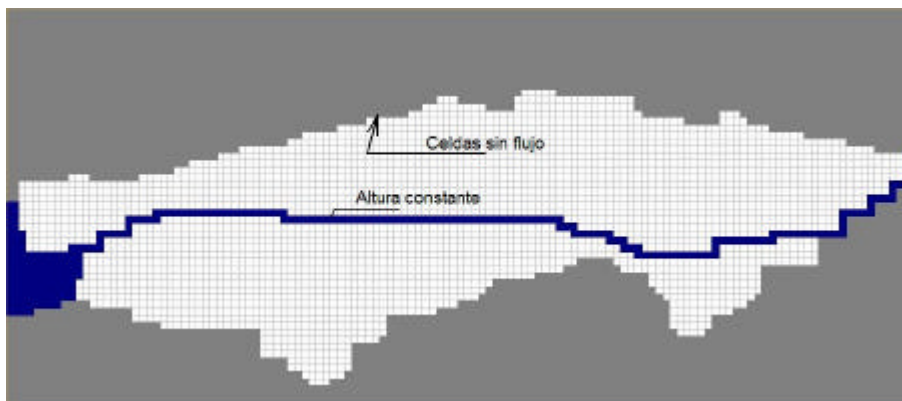


Figura 8. Condiciones de borde del modelo de aguas subterráneas.

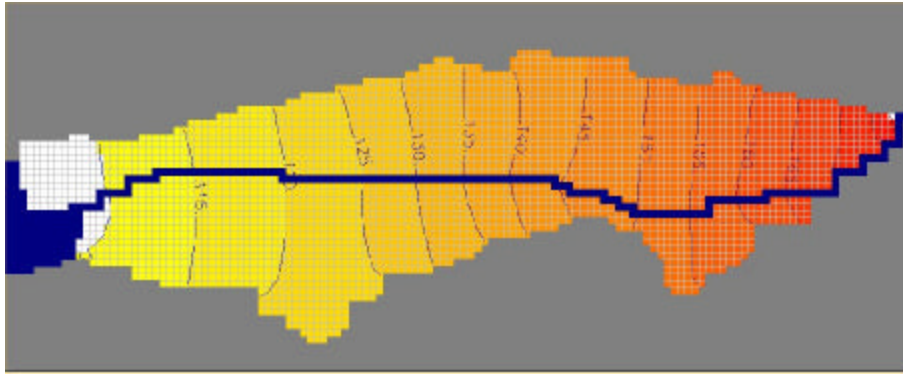


Figura 9. Ejemplo de los resultados obtenidos con el modelo de aguas subterráneas.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las series de datos obtenidas a partir de los diferentes sistemas de monitoreo y de modelación, han sido analizadas sistemáticamente, de manera integrada. A partir de estos resultados ha sido posible entender el funcionamiento del sistema hidrológico en el valle, su dinámica y la relación con la actividad agrícola. A continuación se presentan los principales resultados derivados del monitoreo del valle de Peumo.

Efecto de la Red de Canales en la Hidrología del Valle de Peumo

La Figura 10 muestra la variación en la profundidad del nivel freático para dos pozos de observación en el valle. Como se observa, después de abierta la compuerta en bocatoma, el nivel freático aumenta alrededor de 40 cm. Para estudiar en mayor detalle esta dinámica, durante el año 2005 se instalaron dos sensores de nivel freático en dos pozos de observación en línea, perpendiculares a un canal ($\sim 1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), en un huerto de vides. Los sensores fueron programados para registrar datos de nivel cada 1 hora durante dos meses. La Figura 11 muestra los niveles freáticos medidos, donde se observa en ambos pozos un ascenso continuo de 30 cm., que está desfasado en aproximadamente 5 días. Lo anterior puede interpretarse como el tiempo de viaje del agua entre ambos puntos, si se considera que el flujo es predominante en la dirección de la línea que forman los dos pozos. Además, para ambos puntos de observación, el nivel freático tiende a estabilizarse después de 15 días de iniciado el ascenso.

Para ambas mediciones (Figuras 10 y 11) los resultados son consistentes, lo que evidencia un efecto importante de la red de canales en el sistema de aguas subterráneas, que además genera implicancias desde el punto de vista de manejo de cultivos. En efecto, los pozos de observación están ubicados en un predio de producción de uva para vinos, donde se somete a las vides a estrés hídrico para aumentar el contenido de azúcares en las bayas; sin embargo el sistema radicular de las vides en el huerto estudiado es activo en los primeros 2 metros de suelo, por lo que, considerando que la profundidad el nivel freático durante la temporada tiene fluctuaciones entre 1,3 m y 2,3 m, el cultivo extraerá agua desde estratos más profundos y no el agua de riego almacenada en los estratos superficiales.

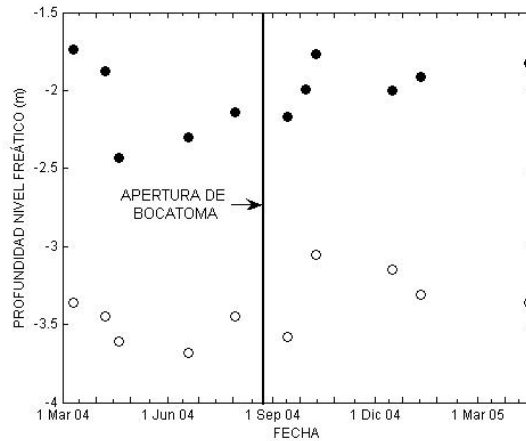


Figura 10 Niveles freáticos medidos en dos pozos de observación en el Valle de Peumo.

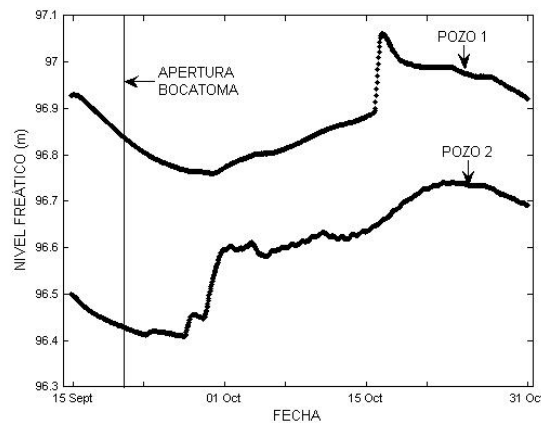


Figura 11. Niveles freáticos medidos cada 1 hora en 2 pozos ubicados en un huerto de vides. La cota de terreno es de 98.3 m y se encuentran separados a 250 m.

La estabilidad del nivel freático en el valle y sus ventajas respecto a la degradación de contaminantes tiene un riesgo asociado a posibles cambios dentro del régimen hidrológico de la cuenca y cambios en los patrones de recarga de aguas subterráneas. Posibles modificaciones en la infraestructura de riego, como el revestimiento de los canales, podrían producir problemas de disponibilidad de aguas subterráneas o cambios en los niveles productivos por aumento de la profundidad del nivel freático, ambos asociados a la disminución de la recarga por filtraciones desde los canales. Desde el punto de vista de la calidad, si se modifican los patrones de recarga, también se redistribuyen en tiempo y espacio las zonas de amortiguamiento y de almacenamiento transitorio de contaminantes, aumentando el riesgo de entrada de estos al sistema de aguas subterráneas y a los cuerpos receptores.

Zonas hiporreicas y vegetación ribereña

La interacción entre el agua subterránea y el río, y en menor escala el paso de los canales principales sobre el acuífero, genera zonas hiporreicas (zonas de intercambio de agua entre el acuífero y el cauce) verticales y laterales, donde los contaminantes aumentan su tiempo de residencia en la zona saturada y no saturada. En estas zonas, la actividad microbológica y el crecimiento de macrófitas en las riberas aumentan las posibilidades de degradación o extracción de contaminantes y reducen la carga de nutrientes que potencialmente puede ingresar a los cauces (Cey et al., 1999; Cirimo & McDonnell, 1997).

Durante los ensayos de campo se ha observado la presencia abundante de vegetación ribereña con un crecimiento considerable. Los resultados de análisis foliares, mostraron que el contenido de nitrógeno en la vegetación ribereña (1000 mg kg^{-1}) es al menos comparable al nivel controlado en las hojas de cultivos de uva vinífera bajo fertirrigación. La hipótesis propuesta para estos resultados dice relación con la capacidad natural de estas plantas para captar y fijar nitrógeno proveniente de las aguas de drenaje y de escorrentía dentro de la cuenca. Bajo estas consideraciones, la vegetación ribereña actúa como un biofiltro que naturalmente ha contribuido a mantener bajos niveles de nitrógeno en las aguas superficiales, además de mejorar parámetros de calidad como turbidez y conductividad eléctrica.

CONCLUSIONES

El análisis de las mediciones de los distintos sistemas de monitoreo ha permitido evaluar cuantitativamente el efecto de la agricultura intensiva en el Valle de Peumo. El análisis del impacto de la actividad agrícola se sustentó en el diseño de una red de monitoreo representativa de la dinámica dentro del valle y un marco conceptual que considera la interrelación entre los sistemas de agua superficial, subterránea y de riego y otros componentes del agro-ecosistema del valle.

La red de canales en el valle de Peumo tiene una fuerte influencia en el sistema hidrológico, definiendo los patrones espaciales y temporales de recarga. En efecto, una vez que se abren las compuertas en las captaciones, se produce un ascenso sostenido de los niveles freáticos debido a la infiltración desde los canales. Una vez que se ha establecido un nuevo equilibrio, la profundidad del nivel freático se mantiene constante bajo la influencia conjunta de la red de canales y los sistemas de riego. Esta interacción entre los sistemas de aguas superficiales, de riego y subterráneas afecta, y de cierta manera determina, las condiciones de manejo de la agricultura dentro del valle y la planificación del riego.

Los procesos de recarga por efecto de infiltración desde los canales debe ser analizados y cuantificados, debido a que los derechos de aprovechamiento de agua superficial son traspasados a derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Dichos derechos han sido asignados considerando los niveles freáticos registrados, pero no identifican la fuente de la recarga ni la magnitud de esta, por lo cual es necesario avanzar en el balance hídrico del valle midiendo los caudales del río Cachapoal y los principales canales en la salida del valle.

En el valle existen bajos valores de concentración de nitratos en las aguas subterráneas, pero se han detectado fuertes concentraciones en la lixiviación debido a las prácticas de

fertilización. Lo anterior puede explicarse por el efecto conjunto de los sistemas de riego presurizado y estabilidad de los niveles freáticos, que generan zonas de almacenamiento transitorio. En estas zonas se aumenta el tiempo de residencia y la probabilidad de degradación de los contaminantes por parte de bacterias desnitrificadoras (Arumí et al., 2005).

La posibilidad de revestir los canales de riego implicaría cambios en los patrones de recarga, ya que al no producirse infiltración desde los canales, los niveles freáticos bajarán en el verano y se afectará también la disponibilidad de aguas subterráneas. Por otro lado, el efecto de bio-purificación de la vegetación ribereña disminuirá y será necesario reformular las prácticas agronómicas y de riego para mantener los niveles productivos actuales.

Los resultados muestran que el análisis del sistema hidrológico en un valle intervenido por actividad agrícola de riego, debe realizarse sobre la base de un enfoque sistémico que considere cada uno de los sistemas que lo componen como un continuo, es decir, considerar las filtraciones desde los canales de riego una “transferencia” y no una “pérdida”. Una aproximación al análisis planteado considera recomendaciones de manejo que aumenten la eficiencia del uso del agua a nivel predial, de tal manera que se aproxime a la eficiencia a nivel de cuenca.

LITERATURA CITADA

- ARUMÍ J.L., R. OYARZÚN, M. SANDOVAL (2005). Natural protection against groundwater pollution by nitrates in the Central Valley of Chile. *Hydrological Sciences Journal* 50(2): 331-340.
- CEY E., D. RUDOLPH, R. ARAVENA, G. PARKIN (1999). Role of the riparian zone in controlling the distribution and fate of agricultural nitrogen near a small stream in southern Ontario. *Journal of Contaminant Hydrology*, 37: 45-67.
- CHIANG W.H. Y W. KINZELBACH (1998). *Processing Modflow. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Springer-Verlag New York. ..\$ pp.
- CIRMO C., J. MCDONNELL (1997). Linking the hydrologic and biogeochemical controls of nitrogen transport in near-stream zone of temperate-forested catchments: a review. *Journal of Hydrology*, 199:88-120.
- FERNALD A. (2002). *Groundwater/Surface Water Interactions*. New Mexico Water Resources Research Institute Report No 323, 320 pp.
- KHEPAR S., A. YADAV, S. SONDHI, A. SHERRING (2000). Modelling surplus canal water releases for artificial recharge of groundwater through surface drainage systems. *Irrigation Science*, 19(2): 95-100.
- MILLAR A. (1993). *Manejo de agua y producción agrícola*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- ORREGO X. (2003). *Caracterización hidrológica del valle del río Cachapoal sector Peumo-Las Cabras usando un sistema de información geográfica*. Memoria de Título, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
- ORREGO X., J.L. ARUMI, E. HOLZAPFEL (2005). Evaluación de prácticas de fertirrigación en una plantación de paltos usando el modelo HYDRUS 2_D. XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.

- RIVERA D., J.L. ARUMÍ, J. JARA (2004). Transporte de Agua en el Continuo Suelo-Planta-Atmósfera, un Punto de Vista Hidráulico. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica 19: 21-30.
- SOPHOCLEOUS M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. Hydrogeology Journal 10: 52-67.
- TAGHAVI S., M.MARIÑO, D. ROLSTON (1984). Infiltration from trickle irrigation source. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 11(4): 331-341.
- TÓTH J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes and manifestations. Hydrogeology Journal, 7:1-14.
- WINTER T., J. HARVEY, O. FRANKE, W. ALLEY (1998). Ground water and surface water – a single resource. US Geological Survey Circular 1139.