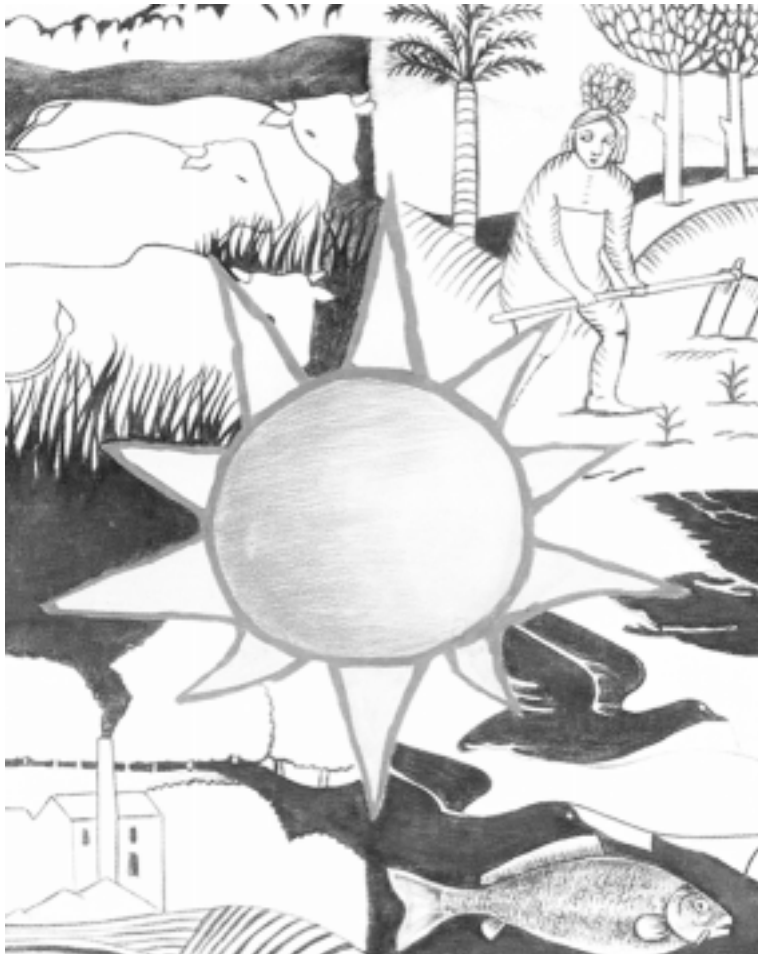


ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA EN EL VALLE DE PEUMO, CHILE

Impact analysis of agricultural activities in Peumo valley, Chile

Diego Rivera, José Luis Arumí & Eduardo Holzapfel



Departamento de Recursos Hídricos. Universidad de Concepción. Avenida Vicente Méndez 595, Chillán, Chile. Correo electrónico: dirivera@udec.cl.

RESUMEN

Se presenta la integración de un marco teórico de análisis del impacto agrícola y sistemas de monitoreo aplicados en el Valle de Peumo ubicado en la VI Región de Chile. El objetivo de este trabajo es estudiar la relación entre la producción agrícola, la hidrología, transporte de contaminantes y niveles productivos. Específicamente se estudió la interacción entre las aguas de riego (red de canales) y las aguas subterráneas, bajo el concepto de continuo eco-hidrogeológico, donde el clima, la hidrología, la hidrogeología, las condiciones de manejo y los cultivos interactúan dinámicamente. De acuerdo a lo anterior, se controlaron variables en el suelo, agua y plantas que fueron analizadas de manera sistémica e integrada. La aplicación del marco teórico propuesto y los datos colectados permitieron establecer que la red de canales mantiene niveles freáticos estables, recargando en verano las aguas subterráneas e interceptando la escorrentía en invierno. Se encontraron zonas de almacenamiento transitorio de polutos en la zona radicular de cultivos bajo riego presurizado y en las riberas de los canales.

Palabras clave: sistemas monitoreo, interacción agua superficial-agua subterránea, riego, agricultura, impacto ambiental.

ABSTRACT

This paper presents the integration of a theoretical framework with monitoring systems applied to the study of the agricultural valley of Peumo, located in the VI Region of Chile. The objective of this study is to evaluate the relationship between agriculture productions, hydrology and contaminant transport; focusing in the interaction of irrigation water and the groundwater system under the concept of an eco-hydrogeological continuum. According to this, soil, water and plant variables were controlled. The irrigation channel network maintains a stable phreatic level in the Valley, recharging during summer season and intercepting in winter runoff and groundwater flow as a drainage network. It was found that under the pressurized irrigation system for orchards the soil transitorily stored pollutants in the intermediate vadose zone. Other pollutant transitory storage area was found in the irrigation channel banks.

Keywords: monitoring systems, surface water-groundwater interactions, irrigation, agriculture, environmental impact.

INTRODUCCIÓN

El impacto de la agricultura en el medio ambiente tiene variados efectos; sin embargo, es el agua el componente que enlaza las actividades productivas y las condiciones ambientales dentro de una zona. Los sistemas de agua superficial y de aguas subterráneas, interactúan en forma compleja y dinámica. Esta interacción se manifiestan a través de la hidrología e hidráulica, la química y minearología, 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 agua.

Los procesos de recarga y contaminación de las aguas subterráneas, dependen del clima, topografía, geología, suelos, hidrogeología, cultivos y prácticas agrícolas (Mossbarger & Yost 1989, Cortés 2001), con lo cual es posible establecer que el estudio de los sistemas de aguas subterráneas y sus relaciones con los sistemas de aguas superficiales, que incluyen los sistemas de transporte y distribución de aguas de riego, permiten evaluar el impacto de las actividades agrícolas dentro de un zona específica.

El valle de Peumo (Fig. 1) es un valle transversal con una importante actividad agrícola, orientada al mercado nacional y de exportación, ubicado en el valle central de Chile (Sexta Región, 34,3° Sur), donde es común encontrar zonas de riego ubicadas sobre acuíferos

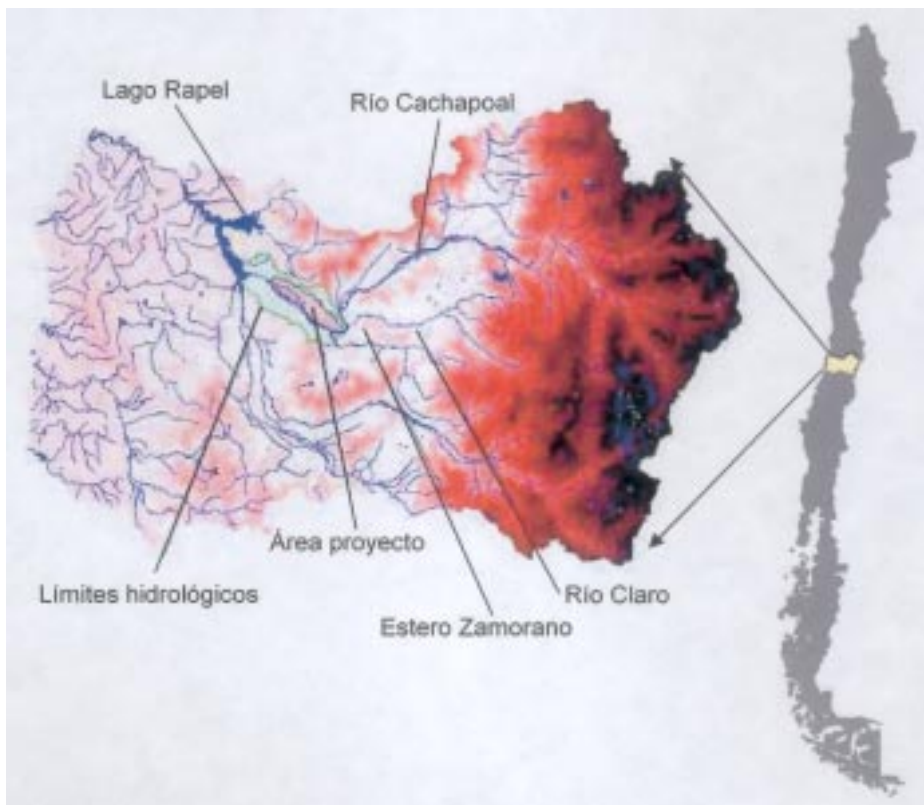


FIGURA 1. EL VALLE DE PEUMO, SEXTA REGIÓN DE CHILE.

The Peumo Valley.

superficiales no confinados y sistemas de conducción de agua de riego, normalmente canales sin revestir, con pérdidas de conducción del orden de un 30% (Arumí et al. 1994). Para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos en el Valle de Peumo, se ha construido una red de canales en el pie de monte y en el valle que transporta agua captada del río Cachapoal en el ingreso al valle (Punta Peumo). 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. Sin embargo, al igual que en otras cuencas de uso agrícola, en el valle de Peumo no existe claridad acerca de las relaciones entre el régimen hidrológico, el clima, la hidrogeología y el manejo en los niveles productivos y de calidad de los cultivos.

Durante los años 2003 al 2005 se instaló una red de monitoreo de variables ambientales, físicas y químicas en el suelo, agua y cultivos, con el objeto de estudiar el efecto de la agricultura intensiva en el valle de Peumo a nivel de mesoescala, buscando identificar fenómenos de relevancia en el transporte de contaminantes y decisiones de manejo, sin pretender expandir el análisis a nivel de cuenca, donde los procesos en mesoescala son encubiertos.

El concepto de mesoescala se refiere a la escala espacial intermedia entre el nivel regional (valle) y el nivel local (árbol o planta). De esta manera, se considera un huerto o predio como un sistema en sí mismo y no como la simple agregación de árboles o plantas individuales. El valle tiene una extensión de aproximadamente 16.000 ha, de las cuales el 60 %

están sometidas a agricultura intensiva. El sistema de monitoreo considera la instalación, aplicando diseño experimental, de ensayos y sensores en cuatro predios, representativos de aproximadamente 4.000 ha.

Este artículo presenta el marco conceptual utilizado en el estudio del impacto de la actividad agrícola, la red de distribución de aguas de riego y sistemas de riego en la hidrología del valle de Peumo, mediante sistema de monitoreo de variables que consideren fenómenos de mesoescala. Este esquema de análisis considera los sistemas de monitoreo y modelación como herramientas cooperativas en el proceso de gestión y planificación de los recursos hídricos, donde a partir de datos experimentales, es posible establecer una integración conceptual de los procesos. Una vez definidas las hipótesis y teorías es posible validarlas y ajustarlas mediante el uso de nuevos datos experimentales.

El vínculo entre los datos medidos, el modelo conceptual y los resultados simulados mediante herramientas numéricas, es el Principio de Similitud (Rivera 2006) donde se establece que los sistemas de monitoreo son indispensables en la evaluación y análisis del impacto de la actividad agrícola en la hidrología del valle; sin embargo, los valores medidos son necesarios pero no suficientes para el entendimiento y descripción de la dinámica del valle, pues es necesario desarrollar una conceptualización del caso de estudio.

La organización de este artículo es la siguiente. Se presenta una breve revisión respecto a la relación entre riego, agricultura y medioambiente. Luego, en la sección de Materiales y Métodos se describirá la zona de estudio, se formalizará el Principio de Similitud y el modelo conceptual aplicado y se describirán los sistemas de monitoreo usados. En la sección de Resultados y Discusión, se presentarán y discutirán los resultados iniciales,

particularmente la interacción entre los sistemas de aguas superficiales, subterráneas y de riego, el efecto de la red de canales en la hidrología del valle, el transporte de agroquímicos en las zonas regadas por sistemas presurizados y los posibles cambios en los patrones de recarga. Finalmente se presentan las conclusiones y comentarios respecto a la dinámica entre los sistemas estudiados, regionalmente y localmente, y la aptitud de los sistemas de monitoreo en el manejo y control del impacto de la agricultura en el valle.

Riego agricultura y medio ambiente

Desde la perspectiva de la sustentabilidad es necesario revisar el impacto medioambiental de la agricultura de riego en los recursos hídricos. En efecto, durante las últimas décadas, la agricultura ha debido enfrentar una fuerte competencia con otros sectores productivos de mayor eficiencia económica y de uso, dado que el 84,5 % de los derechos consuntivos de uso de agua otorgados en Chile son destinados a fines agrícolas (DGA 1999).

Por otra parte, la actividad agrícola afecta los ciclos de materia y energía dentro de los ecosistemas intervenidos, ya sea por la inclusión de fertilizantes, disposición de excedentes, labores mecanizadas o uso del agua. De esta manera, la mantención de los agroecosistemas, frágiles e inestables, consideran un alto subsidio energético para mantener, principalmente, una baja biodiversidad dentro de las zonas de cultivo que permitan aumentar los rendimientos (Henry & Heinke 1999, Odum 1993).

El manejo y planificación de los recursos hídricos no debe basarse solamente en aspectos técnicos o consideraciones locales, sino más bien en una perspectiva global que permita el aseguramiento del recurso a las generaciones futuras y la satisfacción de las deman-

das actuales sin degradar los ecosistemas. Martín de Santa Olalla Mañas et al. (1999) señalan que un apropiado manejo socio-económico en las prácticas de irrigación puede lograrse si se utiliza un marco de gestión que contemple los impactos en el medioambiente, pérdidas en las reservas de los acuíferos o incrementos en la recarga de nitratos.

La conservación de los recursos hídricos en zonas agrícolas debe ser estudiada dentro de un marco que considere el balance de agua para una zona específica y definida. No obstante, la conservación del agua a nivel predial o la reducción de agua aplicada no son necesariamente sinónimos de sustentabilidad, porque en muchos casos las aguas de exceso son reusadas dentro de la cuenca en cauces y acuíferos (Burt 1995).

Tóth (1970; citado por Tóth 1999) define el “ambiente hidrogeológico” como un marco conceptual en el cual 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. Estas interacciones con el ambiente, en especial con aguas superficiales, son complejas, por lo que Sophocleous (2002) expande el concepto de ambiente hidrogeológico a uno “eco-hidrogeológico” en donde se considera también la significancia ecológica y los impactos de la actividad humana en dichas relaciones.

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, en conjunto con los sistemas de distribución de agua de riego y los sistemas de riego, un “continuo hidrológico” (Winter et al. 1998).

La aplicación del agua a los cultivos deter-

mina una serie de procesos físicos, químicos y biológicos en el ecosistema. Dentro de estos procesos tenemos las pérdidas de agua por infiltración en los canales, la percolación del exceso de agua a la zona vadosa y la zona saturada del suelo, el transporte de sedimentos, pesticidas, fertilizantes y elementos alóctonos a la columna de suelo y la interacción del material transportado por el agua con el suelo.

Parte importante de estas pérdidas de conducción desde la red de canales corresponden a filtraciones que pueden recargar los acuíferos. Fernald (2002) evaluó el efecto de estas filtraciones en el balance hídrico en la zona regada del Río Grande (EE.UU.), mostrando que el riego no sólo actúa como una fuente de recarga, si no más bien como una nueva condición de borde que determina localmente los patrones de flujo y el tiempo de residencia en la zona vadosa de potenciales polutos.

Troiano et al. (1993) muestran que la distribución de polutos en el perfil de suelo es dependiente de la cantidad de agua percolada, estableciendo que el riego gravitacional, dadas las prácticas actuales, es el método que percola la mayor cantidad de agua, mientras que los métodos de riego presurizado lixivian la menor cantidad de polutos. Sin embargo, lo anterior no implica que la elección de un método de riego permita disminuir per se el riesgo de contaminación, ya que los volúmenes de agua percolada dependen de la operación y el manejo de los sistemas de riego. Por lo anterior, la operación de un sistema de riego debe sustentarse en la aplicación de las cantidades correctas de agua y el conocimiento de la cantidad disponible.

Para modelar y mejorar el manejo y gestión del agua, los procesos hidrológicos y el efecto de la actividad agrícola en la calidad, cantidad y distribución de los recursos hídricos, el ciclo hidrológico debe considerarse en su amplio rango de escalas y variabilidad

espacio-temporal. Las conceptualizaciones que se realicen para generar modelos funcionales deben considerar que el concepto de escala no es arbitrario ni en rangos continuos (Kleme 1983) y que la elección de un paso de tiempo determinado afecta los resultados. La actividad agrícola y el efecto del sistema hidrológico en esta actividad es apreciable a escalas intermedias o mesoescala, en especial en la etapa transiente de la interacción entre los sistemas de aguas superficiales y subterráneas (Wroblicky et al. 1998, Winter 1999). Como ejemplo de estos fenómenos de mesoescala, puede mencionarse el efecto de las filtraciones desde la red de canales de distribución de aguas de riego en el patrón de flujos de las aguas subterráneas y la aparición de zonas de almacenamiento transitorio de contaminantes, la importancia del flujo no saturado en los procesos de recarga y almacenamiento de agua y polutos (Sophocleous 2002) o el movimiento de nitratos en zonas regadas (Böhlke 2002).

Por otra parte, los modelos de transporte de contaminantes en la actualidad son aplicables a escalas regionales o locales. Como ejemplo, a escala regional, MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988) presenta problemas para simular procesos en las cercanías de las fronteras del dominio y en interfaces, donde generalmente existe intercambio entre el sistema agrícola y el ambiente (Sophocleous 2002, Wroblicky et al. 1998). La modelación en mesoescala no implica el refinamiento de mallas o la aplicación local de modelos en distintas ubicaciones, sino una conceptualización nueva, que integre las diferentes escalas espacio-temporales en las ecuaciones y modelos utilizados, de tal manera que las respuestas sean integradas y que sea posible apreciar las influencias entre sistemas. Como señalan Sophocleous et al. (1988) y Wroblicky et al. (1998), el avance en modelación y conceptualización debe basarse en el análisis

multidimensional del problema de interacción entre aguas superficiales y subterráneas y en el desarrollo de enfoques de escalamiento y análisis desde el sitio específico a escala regional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

En el valle de Peumo los cultivos corresponden principalmente a cítricos, paltos, vides y una industria vitivinícola que produce vinos de alta calidad, basada en el clima y en un cui-

dadoso manejo agronómico y de riego. Se encuentra rodeado por dos cadenas de cerros paralelas al cauce de río Cachapoal (Fig. 2), lo cual delimita el área generadora de escorrentía en los meses de invierno. Por otra parte, el río es una condición de borde respecto a las zonas de recarga y descarga de las aguas subterráneas. Por último, el río desemboca en el Embalse Rapel, lo que implica una nueva condición de altura piezométrica para el sistema hidrológico. La altura de escurrimiento en el río es relativamente constante (Fig. 3), con una planicie de inundación ancha que permite evacuar las crecidas rápidamente (menos de 24 horas). Estas caracte-

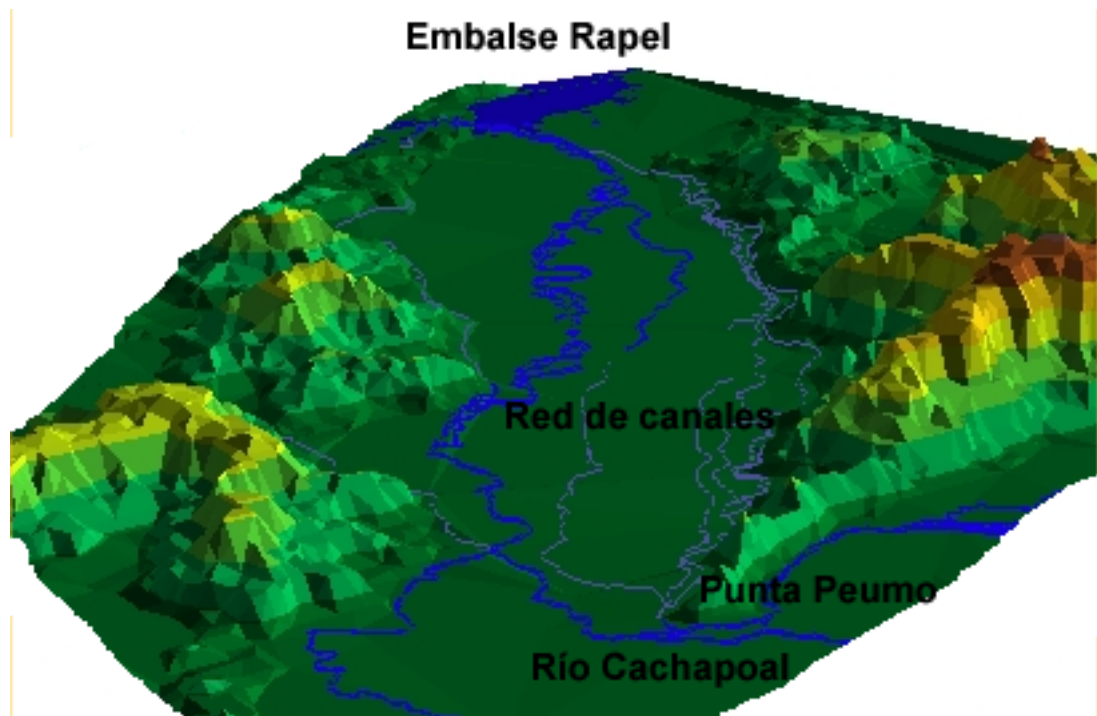


FIGURA 2. MODELO DIGITAL DE TERRENO PARA EL VALLE DE PEUMO Y CON LA RED DE CANALES ESTUDIADA.

Digital elevation model for the Peumo valley, showing the channel network.

rísticas son interesantes desde el punto de vista de la modelación ya que definen un sistema acotado con condiciones de borde claras.

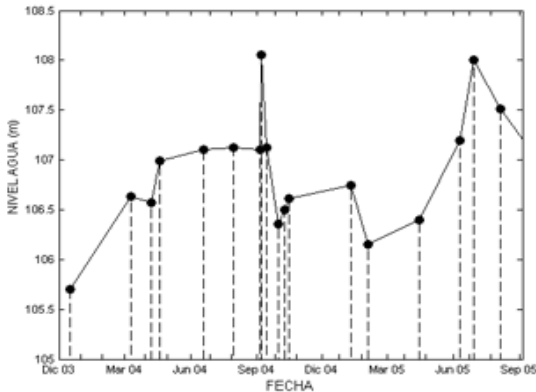


FIGURA 3. VARIACIÓN DE LA ALTURA DE ESCURRIMIENTO PARA EL RÍO CACHAPOAL EN EL PUENTE LAS CABRAS.

Water head for the Cachapoal River at Las Cabras Bridge.

El área de estudio puede ser dividida en tres zonas geomorfológicas: río, valle y laderas de cerro, que se corresponden con sus características hidrológicas e hidrogeológicas. La zona del río corresponde a depósitos fluviales en cauces actuales (gravas y gravas arenosas), conformando secuencias de acuíferos libres y semiconfinados, con niveles freáticos estáticos influenciados por el nivel de agua en el río y esteros, con un alto potencial de explotación hídrica.

El valle de aproximadamente 16.000 ha y bajas pendientes, corresponde a depósitos aluviales donde se alternan bolones, ripios y gravas, con frecuentes niveles lenticulares de arenas y arcillas. Los acuíferos en su mayoría son libres y semiconfinados, con algunas zonas donde se encuentran acuíferos confinados por bancos de arcillas y/o depósitos laháricos y un potencial de explotación hídrica considerado alto-medio.

Es en el valle, altamente productivo y de agricultura intensiva, donde se ubica una red de canales de riego sin revestir que capta en $3,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (octubre) y $7,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (febrero). Los canales principales atraviesan una zona de depósitos aluviales permeables que favorecen la interacción con las aguas subterráneas. En efecto, Orrego (2003) muestra que en el valle se genera aproximadamente un 78 % de la recarga de las aguas subterráneas.

La zona de ladera de cerro, con una superficie de aproximadamente 11.900 ha y una inexistente agricultura de riego presurizado, está constituida principalmente por rocas porosas fracturadas y suelo residual llamado «maicillo» donde los acuíferos están conectados por fracturamiento.

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, para descargar 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.

Principio de similitud

Parte importante de la discusión respecto al método de análisis propuesto, tiene el concepto de SIMILITUD como base en la integración

de los procesos de modelación, monitoreo y gestión, en un esquema recursivo e iterativo. En este esquema, los sistemas de monitoreo generan datos de entrada a los modelos y mediante sus análisis es posible ajustar o generar nuevas hipótesis, que a su vez permiten mejorar los modelos conceptuales.

Basado en los trabajos de Giere (1999, 2004), Teller (2001) y Suárez (2003) es posible establecer la siguiente proposición lógica:

A usa **B** para representar **W** con un objetivo **O**

donde **A** puede ser un ingeniero (científico), una comunidad o cualquier persona que realice el acto de representar. **W** corresponde a un fenómeno, propiedad o conjuntos de éstas de un sistema real, que es representado con un objetivo **O**, utilizando un modelo **B**, que puede ser explicativo, investigativo, funcional, abstracto o teórico.

Esta proposición para el proceso de modelación debe además incluir la direccionalidad de la representación, i.e., la entidad **B** comparte o posee propiedades o características que permiten que represente **W**.

Los modelos son dependientes del contexto en que se aplicarán, del objeto o sistema a representar y del objetivo del proceso de representar o modelar. De esta manera, los objetos o sistemas reales tienen propiedades, mientras que estas propiedades son parte de los modelos (Teller 2001). Por otra parte, una teoría puede definirse como un conjunto de modelos que explique o represente un fenómeno o propiedades de un sistema (Giere 1999). Este conjunto de modelos, no necesariamente debe responder a una jerarquización determinada ni todos los principios e hipótesis consideradas deben o pueden ser testadas empíricamente (Giere 2004), por lo cual la comparación entre el sistema real y el modelo o teoría propuesta debe establecerse sobre fenómenos o conjuntos de propiedades.

El isomorfismo es un concepto donde dos conjuntos de objetos, sistemas o funciones tienen una relación uno-a-uno para una o más características. Un concepto de mayor funcionalidad desde el punto de vista de la modelación, es el de similitud, que implica una menor rigurosidad en su definición y que incluye una parte de evaluación cualitativa por parte del usuario. La similitud considera un sistema concreto y una entidad abstracta llamada modelo donde la comparación se realiza sobre propiedades relevantes y semejantes, de tal manera que la representación sea funcional.

La aplicación del concepto de similitud no requiere una medida fija y rigurosa (Giere 2004), pero sí requiere definir el conjunto de propiedades semejantes que permitan comparar el modelo con el sistema real. Una vez definido este conjunto de propiedades, éstas deben medirse en el sistema real y cuantificarse en el modelo. Sin embargo, esta comparación debe realizarse sobre fenómenos o conjuntos de propiedades y no directamente sobre los datos generados por los modelos y los datos monitoreados (Giere 1999). Ambas series poseen un sesgo y por lo tanto su valor de verdad o proximidad a la verdad dependerán de la estimación de los rangos de error.

Los valores obtenidos mediante modelación o monitoreo, poseen un valor de verdad que no es absoluto. Los datos colectados en terreno poseen el sesgo de los errores inherentes a la acción de medir. Los datos simulados corresponden a resultados basados en simplificaciones que también poseen sesgo. Una vez colectados los datos, éstos deben ser analizados, jerarquizados y controlados en su consistencia y calidad, de tal manera que la incertidumbre se minimice. De esta manera, los datos medidos deben ser confiables y representativos y los datos generados deben ser interpretables y en los rangos de error establecidos.

La asignación de valores de verdad -asignación cualitativa respecto a la incertidumbre de una serie de datos- a los conjuntos de datos independientes que se obtengan, plantean un problema a la práctica actual de calibración y verificación de modelos numéricos y modelos matemáticos. En ambos casos los cuantificadores error asignan un valor de verdad absoluto, generalmente 1, a los datos medidos en terreno; y asigna un valor de verdad 0, es decir, los datos simulados deben ser validados y adquirir significancia física. La asignación de valores de verdad absolutos a las series de datos simulados y medidos no permite en lo formal que exista un proceso lógico de revisión de hipótesis ni de ajuste en las mediciones, ya que existe una dependencia de los datos simulados con los datos medidos.

En resumen, el Principio de Similitud dice relación con los valores de verdad asociados a los conjuntos de datos medidos y generados,

donde el proceso de modelación y el modelo elegido deben generar datos interpretables y comparables con las mediciones. Estos conceptos deben estar incluidos en el marco teórico (teorías e hipótesis) que permitan establecer el valor de verdad, contexto dependiente, de estos conjuntos a partir de la similitud entre propiedades. El proceso de modelación es un proceso iterativo, donde se establece que A representa a B, con una direccionalidad definida, pero sin una cuantificación a priori de que A representa exactamente B (Suárez 2003, Giere 2004, Hanna 2004).

El marco conceptual para el proceso de modelación aplicado en el valle de Peumo, y extensible a otros valles, se presenta en la Fig. 4. Para el caso de estudio la teoría inicial establece que el continuo eco- hidrológico está influenciado por las prácticas de agricultura intensiva del valle de Peumo, afectando el transporte de contaminantes y patrones de re-

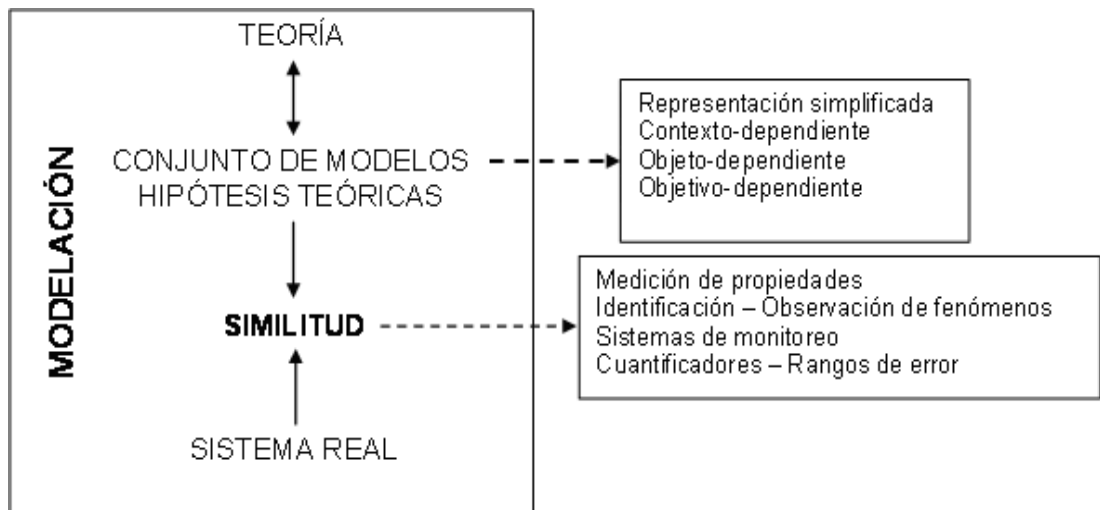


FIGURA 4. MARCO CONCEPTUAL APLICADO EN LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA AGRICULTURA INTENSIVA EN LA HIDROLOGÍA DEL VALLE DE PEUMO.

Conceptual framework applied to the assessment of agricultural effects in the hydrology of Peumo Valley.

carga de las aguas subterráneas. La teoría presentada se basa en las siguientes hipótesis:

1. El sistema a estudiar está compuesto por tres subsistemas o continuos (agua subterránea, agua superficial, agua de riego) que interactúan en tiempo y espacio con los patrones de manejo y cultivo.
2. Es posible modelar el sistema hidrológico dentro del valle utilizando funciones de transferencia entre los tres continuos, acoplados en tiempo y espacio.
3. Los principales factores que afectan el patrón de flujo del agua subterránea y su interacción con el agua superficial y agua subterránea en el valle son la presencia de canales y las zonas hiporreicas.
4. La interacción entre las aguas superficiales y de riego, influye fuertemente en el nivel productivo y de calidad de los cultivos dentro del valle.
5. Los procesos que relacionan el sistema hidrogeológico y los patrones de cultivos son apreciables, principalmente, en mesoescala.

Para operar y trabajar sobre estas hipótesis se utilizaron modelos conceptuales iniciales que simplifican la hidrología del valle de Peumo y la interacción de las aguas superficiales y subterráneas. El modelo matemático básico utilizado es la ecuación de Richards y las herramientas numéricas de solución corresponden al Método de los Volúmenes Finitos y al software MatLab.

Para establecer la similitud entre el modelo numérico desarrollado y el sistema real, se dispone de una red de monitoreo en el suelo, agua y plantas, que permite calibrar algunos modelos específicos (modelos de movimiento de agua), obtener parámetros de entrada (modelos hidrogeológicos) y comparar series de datos (tasas lisimétricas, análisis químico) en puntos o zonas donde sean apreciables los fenómenos de mesoescala. Además, los siste-

mas de monitoreo deben lograr un compromiso entre la frecuencia, densidad y método de muestreo, de tal manera que los objetivos fijados sean cumplidos o superados. La experiencia en el valle de Peumo ha mostrado que una serie de datos de mala calidad, ya sea por inconsistencias en tiempo o espacio, puede ser tan poco útil como una serie de datos inexistente.

Los puntos, zonas y parámetros de monitoreo fueron elegidos en base a la accesibilidad, capacidad de procesamiento de los laboratorios, hipótesis iniciales, modelos aplicados e importancia del cultivo. Los procesos de ciclaje de materia y energía dentro de un ecosistema son continuos en tiempo y espacio, por lo cual la ubicación de los puntos de control y la frecuencia de muestreo deben responder a las necesidades de calidad (densidad y confiabilidad) de los métodos y modelos de análisis.

Con el objeto de estudiar la dinámica entre la hidrología y el manejo del agua, se instalaron distintos sistemas de monitoreo en el valle de Peumo 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). La captura de datos ha permitido evaluar la situación actual, aplicando modelos matemáticos, modelos conceptuales, indicadores de calidad y análisis estadísticos, siguiendo un proceso lógico y continuo de retroalimentación y ajuste de hipótesis (Bredehoeft 2005).

La instalación de los sistemas de monitoreo considera que dentro del ciclo hidrológico, el suelo no sólo almacena temporalmente el agua en capas cercanas a la superficie para uso de las plantas (Guymon 1994; citado por Rivera et al. 2004), sino que actúa como un gran filtro y bio-reactor en el cual las sustancias en exceso resultantes de la actividad agrícola son retardadas, degradadas o inactivadas en su

paso por la zona no saturada hasta la zona saturada. La zona vadosa, donde el agua se mueve en condición de no saturación y puede considerarse como el vínculo clave entre la humedad atmosférica, el agua subterránea y los cultivos (Rivera et al. 2004).

El agua es un elemento primordial en el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, las relaciones agua-producción no son lineales y la demanda de agua por parte de los cultivos depende de las condiciones atmosféricas. El movimiento de agua en el continuo suelo-planta-atmósfera depende del gradiente de potencial del agua. El potencial de agua en el suelo depende de la humedad, mientras que la demanda evapotranspirativa en la atmósfera depende del déficit de presión de vapor. Por lo anterior, el conocimiento de las cantidades de agua aplicada y el agua almacenada en suelo son parámetros importantes que deben ser monitoreados, en especial si se busca establecer relaciones agua-producción.

El control del estado nutricional e hídrico de las plantas permite también estimar el estado del medioambiente, ya que son un organismo integrador que interactúa con el agua, el aire, los nutrientes y las condiciones atmosféricas (Millar 1993). Las plantas intercambian dióxido de carbono y vapor de agua a través de los estomas. A mayor abertura estomática aumenta la actividad fotosintética y la demanda de agua. La planta puede responder a estímulos externos, como la cantidad de agua disponible en el suelo y la radiación solar, aumentando o disminuyendo la resistencia al flujo de vapor de agua en el estoma, para regular la transpiración, en especial en condiciones de déficit de agua (Rivera et al. 2004).

Sistemas de monitoreo

El suelo fue monitoreado, química y físicamente, utilizando tasas lisimétricas y sensores

de humedad, con el objeto de estudiar el movimiento de agua y solutos bajo zonas de cultivo y la interacción entre las aguas de riego y subterráneas. Los sistemas utilizados son:

1. **TASAS LISIMÉTRICAS.** Las tasas lisimétricas (Irrometer Company, Irrometer Moisture Indicator) son tubos de PVC con una punta de cerámica porosa, que pueden ser ubicadas a distintas profundidades en el suelo. Al generar vacío dentro de la tasa lisimétrica, por diferencias de potencial, el agua pasa desde la matriz de suelo al tubo y puede luego ser extraída y analizada químicamente. Los parámetros medidos fueron nitratos, fósforo y potasio, que reflejaran el estado nutricional de los cultivos y lixiviación de nutrientes. Se instalaron alrededor de 100 de estos tubos en cuatro cultivos: cítricos en ladera de cerro, paltos y vides en el valle, y parronales en una zona del valle cercana al río. Este sistema permite frecuencias diarias de monitoreo, son de bajo costo y fácil operación, pero poseen problemas de absorción de compuestos carbonados debido a la composición química de la cerámica; además, debe considerarse que la succión corresponde a una presión negativa de 100 KJ kg^{-1} , mientras que el suelo retiene el agua hasta energías de -1500 KJ kg^{-1} , con lo cual no es posible extraer compuestos retenidos en la matriz de suelo con energías mayores a -100 KJ kg^{-1} .

2. **SENSORES DE HUMEDAD.** Con el objetivo de monitorear el contenido de humedad en la zona radicular y zona vadosa, se utilizó un neutrómetro (Troxler 4300 Soil Moisture Gauge) y un equipo FDR, Frequency Domain Reflectometry (Delta-T Devices Ltd, Profile Probe Type PR1 y lector Theta Meter type HH2 version 2), calibrados con métodos gravimétricos. Am-

bos instrumentos permiten frecuencias de monitoreo entre horaria y mensual, a distintas profundidades. Para realizar las mediciones se instalaron alrededor de 150 tubos de aluminio para neutrometría en huertos de cítricos y parronales y alrededor de 120 tubos de acceso para FDR en huertos de vides y paltos durante la temporada de riego.

El instrumental de monitoreo en el sistema 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. Los sistemas utilizados son:

1. NIVELES FREÁTICOS. El nivel freático corresponde a la distancia desde el nivel del suelo a la profundidad donde la carga de presión del acuífero es cero (superficie libre). Las mediciones se realizaron durante todo el año en seis pozos de observación en áreas representativas de las características del valle, y niveles para el río Cachapoal en la entrada y salida del valle. Para mejorar el conocimiento de la dinámica entre los canales de riego y el agua subterránea en mesoescala, se instalaron punteras en un huerto de vides. Para estudiar la dinámica entre el río y las aguas subterráneas se instalaron punteras en un huerto de parronales cercano al río Cachapoal. El método constructivo fue desarrollado por el equipo del proyecto y corresponde a punteras de acero con una punta cónica que son hincados con golpes de martillo de gran masa. Este método se ha mostrado eficiente y de muy bajo costo. En estas dos unidades experimentales se instalaron además transductores de presión (TruTrack, WT-HR 200 Water Height Datalogger) que tiene integrados sistemas de almacenamiento de datos, con los cuales es posible tener registros de nivel

freático cada una hora. El instrumental se ubicó en puntos tales que fuese posible estimar tiempos de viaje y dirección de flujo subterráneo.

2. CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO. La calidad del recurso hídrico es un tema de gran importancia en la agricultura actual, principalmente debido a los requisitos de inocuidad impuestos por los mercados de exportación y la legislación ambiental chilena. Para realizar un diagnóstico preliminar y 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 de riego, drenes y esteros. En el valle los canales de riego atraviesan ciudades y poblados, por lo cual se establecieron también puntos de control que permitieran estudiar el efecto urbano en la calidad de las aguas. La frecuencia de muestreo fue mensual y se controló pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitratos y coliformes fecales. Se realizaron muestreos para estudios específicos, como mediciones de estreptococos fecales para identificar el origen de posible contaminación biológica (Mendonça 2000). Para estimar el origen de las aguas subterráneas se confeccionaron diagramas de Piper. Este método, mediante el conteo de cationes e iones (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) permite agrupar aguas de origen similar.

Las mediciones en la planta se orientaron al conocimiento del estatus hídrico y nutricional de los cultivos y permiten relacionar producción y calidad (Cifre et al. 2005). Mediante un porómetro (Delta-T Devices Ltd, Porometer AP4) se midió la resistencia estomática (a mayor abertura, menor resistencia estomática

a la transferencia de vapor de agua) de las hojas de vides durante la temporada. Otra forma de estimar el estatus hídricos de las plantas es a través de la medición de la presión del agua dentro del xilema. Si la presión es baja, la planta ha transferido a la atmósfera más agua que la disponible en el suelo, por lo cual el turgor es bajo (hojas mustias). La presión xilemática se midió mediante una cámara de vacío o Bomba Scholander (Eijkelpamp, Laboratory Plant Water Status Console) en un huerto de vides. Complementario a los análisis anteriores, se realizaron análisis foliares para estimar el estado nutricional midiendo el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en el follaje. Debido a la variación horaria de estos parámetros, las mediciones fueron tomadas a la misma hora cada día en lugares específicos en el follaje. Para estimar la variación durante el día, se realizaron mediciones cada hora durante algunos días de la temporada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las series de datos obtenidas a partir de los diferentes sistemas de monitoreo, han sido analizados 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.

El conjunto de datos obtenido de los sensores de humedad permitieron estudiar el movimiento y almacenaje de agua en el tiempo, ya sea para una profundidad determinada (Fig. 5a) o en el perfil de suelo (Fig. 5b). Las series de datos permiten además evaluar la cantidad de agua aplicada. En efecto, si el contenido de humedad se mantiene constante en el perfil, la cantidad de agua es la correcta; mientras que en el caso de sobre estimación o subestimación de la demanda hídrica de los cultivos generan aumentos o dis-

minuciones en el almacenaje de suelo, respectivamente.

Efecto de la red de canales en la hidrología del valle de Peumo

Las mediciones de nivel freático han permitido establecer que la extensa red de canales en el valle de Peumo interactúa con las aguas subterráneas a escala regional, generando una condición de estabilidad de los niveles freáticos en el valle. Como se visualiza en la Fig. 6, la variación anual de dos pozos de observación para el año hidrológico 2004-2005 es de aproximadamente 0,6 m, con un aumento significativo después de la apertura de la bocatoma de canales en septiembre. 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.

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 polutos aumentan su tiempo de residencia en la zona saturada y no saturada. En estas zonas, la actividad microbiológica es alta y, por lo tanto, aumentan las posibilidades de degradación de polutos; además, el crecimiento de macrófitas en la superficie del terreno favorece la extracción de nitrógeno. Como la variabilidad espacial y temporal de las zonas hiporreicas está determinada por la variación del gradiente hidráulico, y considerando que el nivel freático y el nivel del río son relativamente constantes, es posible señalar que estas

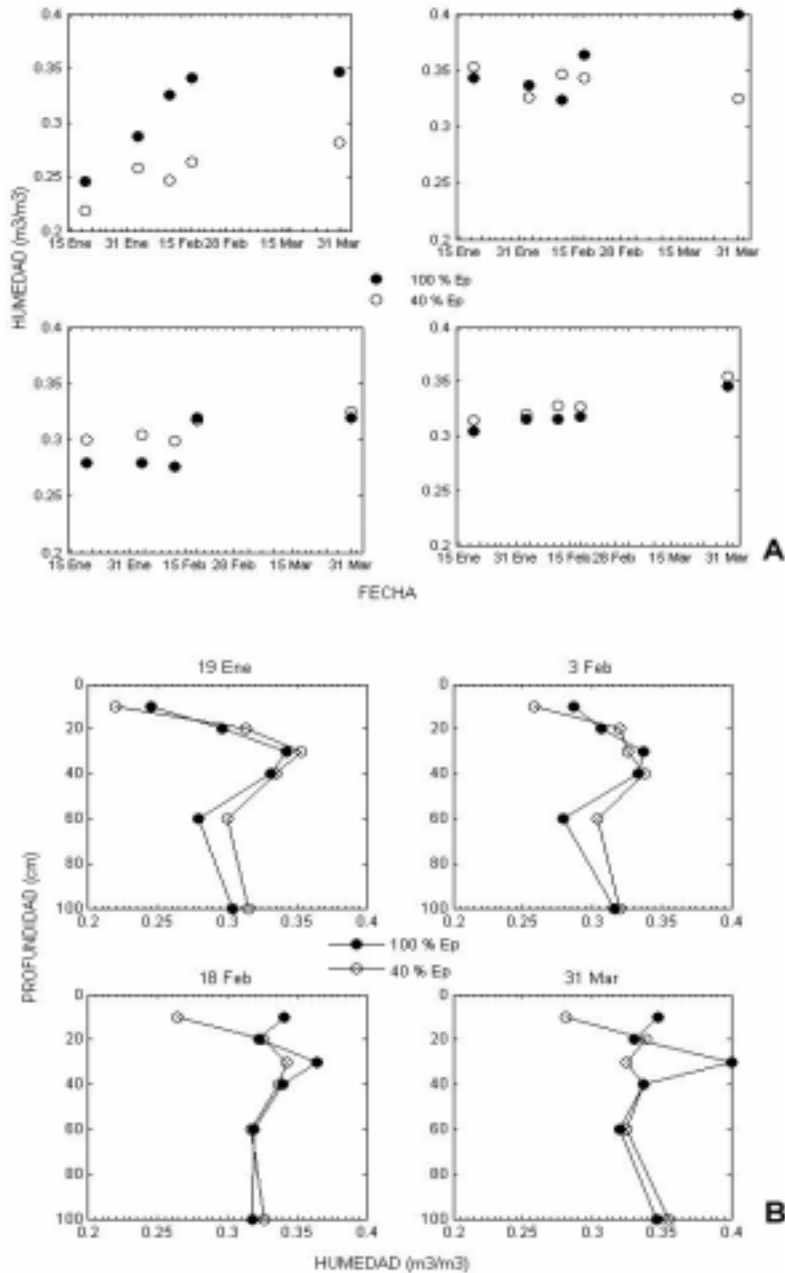


FIGURA 5. MEDICIONES DE HUMEDAD EN UN HUERTO DE PALTOS USANDO FDR EN LA TEMPORADA 2004 (A) HUMEDAD EN EL SUELO PARA 4 DISTINTAS PROFUNDIDADES Y DOS TASAS DE APLICACIÓN DE AGUA, CALCULADAS USANDO EVAPORACIÓN DE BANDEJA (EP) (B) COMPARACIÓN DE PERFILES DE HUMEDAD PARA DOS TASAS DE APLICACIÓN DE AGUA EN CUATRO DISTINTAS FECHAS.

Soil water content in a avocados orchards registered with a FDR in 2004 season (A) Soil water content for 4 different depths and two water application rates using pan evaporation (Ep) data (B) Comparison of soil water content for two different water application rates in four different dates.

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. Como consecuencia, el tiempo de residencia dentro del sistema aumenta.

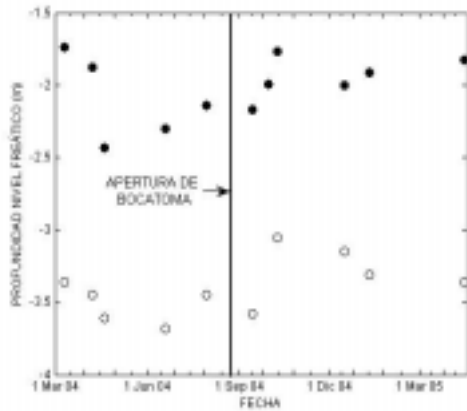


FIGURA 6. NIVELES FREÁTICOS MEDIDOS EN DOS POZOS DE OBSERVACIÓN EN EL VALLE DE PEUMO.

Phreatic levels registered in two observation wells in the Peumo Valley.

Sin embargo, estas características de estabilidad y sus ventajas respecto a la degradación de polutos 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 polutos, aumentando el riesgo de entrada de polutos al sistema de aguas sub-

terráneas y a los cuerpos receptores.

Para estudiar con mayor detalle la dinámica entre la red de canales y los niveles freáticos, se instalaron dos sensores de nivel, programados para capturar datos cada una hora en un huerto de vides. Los pozos se ubican en una línea, separados a 250 m, perpendicular a un canal que transporta aproximadamente $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Los antecedentes de la Fig. 7, permiten observar que existe un ascenso continuo de los niveles freáticos en ambos pozos, de aproximadamente 30 cm. El inicio del ascenso se produce con un desfase de aproximadamente cinco días desde la apertura de bocatoma, lo que 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.

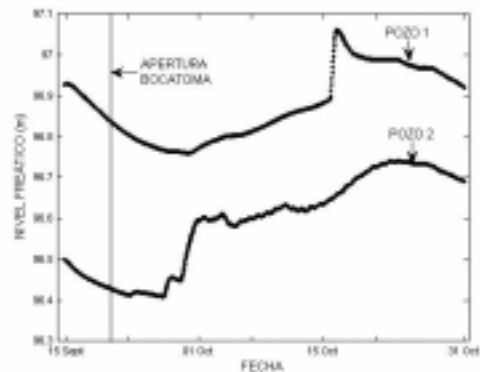


FIGURA 7. NIVELES FREÁTICOS MEDIDOS CADA UNA HORA EN DOS POZOS UBI-CADOS EN UN HUERTO DE VIDES. LA COTA DE TERRENO ES DE 98,3 M Y SE ENCUENTRAN SEPARADOS A 250 M.

Phreatic levels measured every one hour in two wells located in a vineyard. Ground level is 98,3 m and the wells are separated by 250 m.

Para ambas mediciones 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 mane-

jo de cultivos. 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, aplicando un volumen de agua menor a la demanda evapotranspirativa. Monsalve (2005) determinó que el sistema radicular de las vides en el huerto estudiado es activo en los primeros 2 m de suelo, por lo que, considerando que la profundidad del 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.

Contaminación por agroquímicos

En los cultivos bajo riego presurizado (goteros, microjet), se genera una zona húmeda relativamente constante en la temporada de riego donde podrían acumularse potenciales polutos, como fertilizantes.

Los resultados de los análisis químicos de las tasas lisimétricas han mostrado que existen zonas de almacenamiento transitorio de polutos. La Fig. 8a muestra la concentración de nitratos para 30, 60, 90 y 120 cm. de profundidad en un huerto de paltos regados con microjet aplicando un 100 % de la evaporación de bandeja. Los perfiles muestran que entre los 60 y 120 cm existe una zona de acumulación de nitratos debido, probablemente, a las diferencias en la conductividad hidráulica entre el sector húmedo y la zona circundante; además, se observa que a medida que se avanza en la temporada de riego el perfil de nitrato tiende a homogeneizarse, lo que puede interpretarse como lixiviación de estos compuestos. Estos resultados son consistentes a los obtenidos en un huerto de uva de mesa en la temporada 2004-2005 que se muestran en la Fig. 8b.

Las zonas de almacenamiento transitorio pueden explicarse por el movimiento no saturado de agua en el suelo y la no-linealidad en la relación humedad-conductividad. En verano, bajo condiciones de riego, por diferencias de humedad y por la estabilidad bulbo de la zona húmeda, la conductividad hidráulica K_1 dentro del bulbo es mucho mayor que la conductividad hidráulica K_2 en la zona que rodea el bulbo húmedo, generándose una zona de acumulación (Fig. 9). En invierno, los polutos en estas zonas de acumulación podrían ser transportados por el efecto de pulsos de lluvia hasta las cercanías o bajo el nivel freático. Estos resultados son consistentes con los mostrados por Orrego et al. (2005) utilizando el software HYDRUS 2D.

Lo anterior genera algunas consideraciones desde el punto de vista del manejo en los cultivos, ya que por efecto de las zonas de almacenamiento transitorio, aún cuando la aplicación de fertilizantes y pesticidas sea alta, muestras de agua subterránea no reflejarán este hecho. Por otra parte, Arumí et al. (2005) sugieren que el valle Central de Chile posee características naturales de protección contra la contaminación por nitratos en zonas agrícolas, asociado a las condiciones de suelo, clima y/o la estructura de los acuíferos.

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 subterránea y superficial entre el acuífero y el cauce), verticales y laterales, donde los polutos aumentan su tiempo de residencia en la zona saturada y no saturada. En estas zonas, la actividad microbiológica y el crecimiento de macrófitas en las riberas aumentan las posibilidades de degradación o extracción de polutos

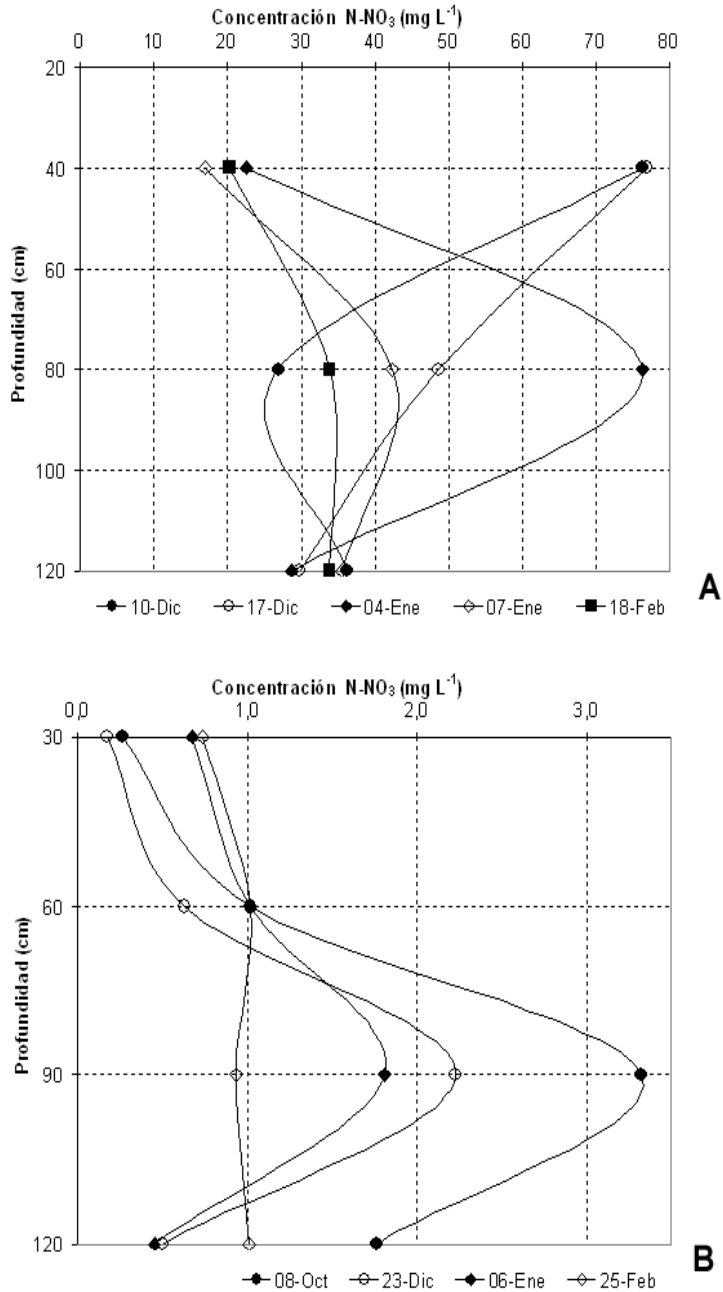


FIGURA 8. **A** CONCENTRACIÓN DE N-NO₃ PARA CUATRO DIFERENTES PROFUNDIDADES EN UN HUERTO DE PALTOS (TEMPORADA 2004-2005) Y **B** CONCENTRACIÓN DE N-NO₃ PARA TRES DIFERENTES PROFUNDIDADES EN UN HUERTO DE UVA DE MESA (TEMPORADA 2004-2005).

A N-NO₃ concentrations for four different depths in a avocados orchards (2004-2005 season). **B** N-NO₃ concentrations for three different depths in a vine tree (2004-2005 season).

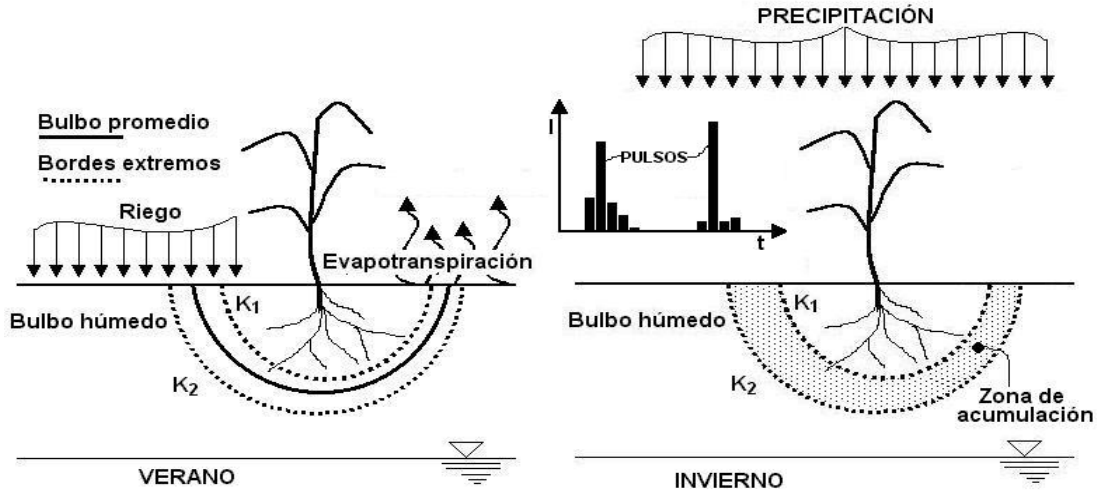


FIGURA 9. PROCESO DE ACUMULACIÓN Y TRANSPORTE DE POLUTOS EN EL BULBO HÚMEDO BAJO RIEGO LOCALIZADO Y CONDICIONES DE PRECIPITACIÓN.

Transitory Storage process and pollutant transport in the wet soil under drip irrigation and rainy conditions.

y reducen la carga de nutrientes que potencialmente puede ingresar a los cauces (Cey et al. 1999, Cirmo & McDonnell 1997).

Durante los ensayos de campo se ha observado la presencia abundante de vegetación ribereña con un crecimiento considerable (Fig. 10). Dado lo anterior se tomaron muestras foliares y se analizó el contenido de nitrógeno. 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 permitido mantener bajos niveles de nitrógeno en las aguas superficiales, además de mejorar parámetros de calidad como turbidez y conductividad eléctrica.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El Principio de Similitud desarrollado (Riviera, 2006) es una herramienta conceptual útil en el diseño de sistemas de monitoreos y en el análisis integrados de datos medidos y simulados. El análisis de las mediciones de los distintos sistemas de monitoreo aplicando esta herramienta 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 y los fenómenos de mesoescala.

Los principales efectos de la red canales en el valle de Peumo se refieren a la estabilidad de los niveles freáticos debido a las filtraciones desde los canales de riego a las aguas



FIGURA 10. VEGETACIÓN RIBEREÑA EN LA RED DE CANALES EN LA TEMPORADA 2004-2005.

Riparian vegetation in the irrigation network during 2004-2005 season.

subterráneas, modificando los patrones de recarga. Por otra parte, se han encontrado zonas de almacenamiento transitorio de polutos debido a la estabilidad de los niveles freáticos y la aplicación de agua mediante riego presurizado.

Se ha identificado una dependencia del nivel productivo dentro del valle respecto a la situación hidrológica e hidrogeológica actual, por lo que se requieren análisis integrados respecto a la gestión y planificación del riego, aplicación de la normativa, modificaciones de infraestructura y manejo agronómico de los cultivos. La aplicación de este marco conceptual ha permitido analizar, por ejemplo, las implicancias de las filtraciones desde los canales de riego en la asignación de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, los cambios en los patrones de flujo y recarga y el uso eficiente del agua en el predio. Las decisiones de planificación en el valle de Peumo deben evaluarse sistemáticamente, considerándolo como un continuo y no como diferentes sistemas aislados. Lo anterior puede ejemplificarse en denominar “transferencias” a las filtraciones desde los canales y no “pérdidas”.

La gestión y planificación ambiental requiere de herramientas de control y evaluación, que permitan ajustar continuamente hipótesis y corregir decisiones. El diseño de sistemas de monitoreo debe considerar un compromiso entre la densidad y frecuencia de mediciones, los costos de monitoreo y los objetivos de la medición. Lo anterior implica que el monitoreo, modelación y toma de decisiones conforman un proceso iterativo que no puede ser diseñado eficientemente “a priori” y que debe ser continuamente evaluado.

Las series de datos colectados deben ser analizadas en un contexto sistémico en el cual, por ejemplo, las mediciones de nivel freático no sólo son útiles en estudio de aguas subterráneas, sino que también en estudios de eficiencia de métodos de riego o cambios en los patrones de extracción de agua por parte de las raíces. Además, en el análisis de estos conjuntos de datos es necesario integrar técnicas que tengan la capacidad de capturar las interrelaciones, como Redes Neuronales Artificiales, Análisis Multivariado, Mapas Auto-organizativos o Diagramas de Disminución Dimensional (Diagramas de Piper).

LITERATURA CITADA

- ARUMÍ JL, COYARCE & MORTÍZ (1994) Evaluación de sistemas de riego en la zona central de Chile. Primer Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola, Chillán.
- ARUMÍ JL, 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.
- BÖHLKE J (2002) Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeology Journal* 10: 153-179.
- BREDEHOEFT J (2005) The conceptualization model problem-surprise. *Hydrogeology Journal* 13(1): 37-46.
- BURT CH (1995) Irrigation water conservation - benefits and tradeoffs. Proceedings USCID Water Management Seminar – Irrigation Water Conservation – opportunities and limitations. The U.S. Society for Irrigation and Drainage Professionals Publications. California. pp 51-58.
- 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.
- CIFRE J, J BOTA, J ESCALONA, H MEDRANO & J FLEXAS (2005) Physiological tool for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis Vinifera* L.) An open gate to improve water-use efficiency?. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 106: 159-170.
- 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.
- CORTÉS A (2001) Análisis de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la cuenca del Río Chillán mediante un modelo SIG. Memoria de Memoria de Título, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, 98 pp.
- DGA (1999) Política Nacional de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA). Santiago de Chile. 58 pp.
- FERNALD A (2002) Groundwater/Surface Water Interactions. New Mexico Water Resources Research Institute Report N° 323. 320 pp.
- GIERE R (2004) How models are used to represent reality. *Philosophy of Science* 71: 742-752.
- GIERE R (1999) Using models to represent reality. En L Magnani, N Nersessia & P Thagard (eds) *Model-Based Reasoning in Scientific Discovery*:41-57. Kluwer/Plenum. 360 pp.
- HANNA (2004) The scope and limits of scientific objectivity. *Philosophy of Science* 71: 339-361.
- HENRY J & G HEINKE (1999) Ingeniería Ambiental. Prentice Hall. 800 pp.
- KLEMES V (1983) Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of Hydrology* 65: 1-23.
- MAC DONALD M & A HARBAUGH (1984) A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. US Geological Survey Open File Report 83.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA MAÑAS F, A BRASA, C FABEIRO, D FERNÁNDEZ & H LÓPEZ (1999) Improvement of irrigation management towards the sustainable use of groundwater in Castilla-La Mancha, Spain. *Agricultural Water Management* 40: 195-205.
- MENDONÇA S (2000) Sistemas de lagunas de estabilización. Mc Graw Hill. 370 pp.
- MILLAR A (1993) Manejo de agua y producción agrícola. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 560 pp.
- MONSALVE R (2003) Relaciones agua planta en *Vitis vinifera* cultivar Carménère, Viña Concha y Toro SA (Cachapoal-Peumo), Sexta Región. Memoria de Título, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. 98 pp.
- MOSSBARGER W & R YOST (1989) Effects of irrigated agriculture on groundwater quality in corn belt and Lakes states. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 115(5): 773-790.
- ODUME (1993) Ecology. Sinauer Associates, Inc. Publishers. 304 pp.
- 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, 44 pp.
- ORREGO X, JL ARUMI & E HOLZAPFEL (2005) Evaluación de practicas de fertirrigación en una plantación de paltos usando el modelo HYDRUS 2_D. XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- RIVERA D (2006) Influencia de la interacción agua superficial, subterránea y de riego en el transporte de contaminantes de origen agrícola. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. 124 pp.
- RIVERA D, JL 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.
- SUÁREZ M (2003) Scientific representation: against similarity and isomorphism. International Studies in the Philosophy of Science 17(3): 225-244.
- SOPHOCLEOUS M (2002) Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. Hydrogeology Journal 10: 52-67.
- SOPHOCLEOUS M, M TOWNSEND, L VOGLER, T MACCLAIN, E MARKS & G COBLE (1988) Experimental studies in stream-aquifer interaction along the Arkansas river in central Kansas- Field testing and analysis. Journal of Hydrology 88: 249-273.
- TELLER P (2001) Twilight of the perfect model. Erkenntnis 55: 393-415.
- TÓTH J (1999) Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, proceses and manifestations. Hydrogeology Journal 7: 1-14.
- TROIANO J, C GARRETSON, C KRAUTER, J BROWNWELL & J HUSTON (1993) Influence of amount and method of irrigation water application on leaching of atrazine. Journal of Environmental Quality 22: 290-298.
- WICHELNS D (2002) An economic perspective on the potential gains from improvements in irrigation water management. Agricultural Water Management 52:233-248.
- WROBLICKY G, M CAMPANA, M VALET & C DAHM (1998) Seasonal variation in surface-subsurface water exchange and lateral hyporheic area of two stream-aquifer systems. Water Resources Research 34(3): 317-328.
- WINTER T (1999) Relation of streams lakes and wetlands to groundwater flow systems. Hydrogeology Journal 7: 28-45.
- WINTER T, J HARVEY, O FRANKE & W ALLEY (1998) Ground water and surface water, a single resource. US Geological Survey Circular 1139. 232 pp.