

CAMBIOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA DEL RÍO MENDOZA SIMULADOS CON EL MODELO SIMGRO¹

José Morábito, Diego Tozzi y Erik Querner

Centro Regional Andino del INA, Facultad de Ciencias Agrarias de la UNCuyo y Alterra (Holanda).

E-Mail: jmorabito@lanet.com.ar

RESUMEN

La provincia de Mendoza tiene más del 20% de la superficie regada total de la Argentina. Como la precipitación media anual en la cuenca del río Mendoza es de aproximadamente 200 mm, el riego es indispensable para la agricultura. El dique de embalse Potrerillos fue recientemente construido en la cuenca mencionada para controlar el caudal y garantizar la adecuada entrega del agua durante el año. Esta obra evidentemente tendrá un impacto sobre la hidrología de la cuenca. Su acuífero también será influenciado, y ello podría llegar a tener un crucial efecto sobre algunas partes del área regadía, donde los niveles de agua subterránea son relativamente altos y cercanos a la superficie cultivada produciendo la salinización de los suelos agrícolas (rizósfera).

Para la evaluación de estos cambios y para tomar posibles medidas de mitigación resulta necesario disponer de indicadores de desempeño a nivel de cuenca que tengan en consideración la eficiencia de uso conjunto del agua (subterránea y superficial).

El modelo SIMGRO fue aplicado en esta investigación. Este modelo hidrológico simula el flujo de agua en la zona saturada, en la insaturada y el agua libre superficial en forma integral. El objetivo fue usar el modelo como una herramienta para evaluar el efecto de los cambios hidrológicos en el área regadía, debido a la construcción del dique. Se presentan escenarios que permiten estimar las pérdidas de agua y su efecto sobre la producción agrícola, por medio del uso de un grupo de indicadores que consideran tanto el agua superficial y como subterránea.

Palabras clave: modelo hidrológico, SIMGRO, riego, salinización.

INTRODUCCIÓN

La provincia de Mendoza tiene más del 20% del total de la superficie bajo riego en Argentina. Con una precipitación media anual de 200 mm, el riego es necesario para la agricultura. Los ríos que se forman con el agua de deshielo de la Cordillera de los Andes son la fuente más importante de abastecimiento de agua. Uno de esos ríos es el río Mendoza y un muy alto porcentaje de su caudal es usado para riego.

En Mendoza el agua para riego es asignada a los agricultores de acuerdo a la superficie que tienen con derecho de riego. Varios trabajos indican que el área cultivada actual es mucho menor que la superficie con derechos de riego. Esto provoca sobre-irrigación y a menudo elevación de los niveles freáticos en años

¹ Trabajo presentado al CONAGUA 2007. Tucumán – Argentina. 2007.

con caudales mayores a los normales. Frecuentemente, el resultado que más se presenta es un aumento de la salinización del suelo, con reducción de la productividad y la consecuente degradación del ambiente. En principio en muchas propiedades no debería ser necesario usar agua subterránea para suplementar el área abastecida con agua superficial, pero, debido a las bajas eficiencias y a problemas de asignación del agua superficial, el agua subterránea se utiliza como complemento. A partir del año 1995 algunos sectores de la provincia de Mendoza han sido sometidos a una extracción excesiva de agua de los acuíferos, ello, más otros factores como los causados por la incorrecta construcción de perforaciones, roturas de cañerías viejas e ineficiente segado de las perforaciones obsoletas, han contribuido a la degradación de la calidad de agua subterránea, generando serios problemas de salinidad en algunos sectores.

Durante los últimos 10 años, paralelamente, se han desarrollado indicadores para cuantificar y calificar el desempeño de las áreas de riego y drenaje. Los indicadores de desempeño abarcan una amplia temática, como: distribución del recurso, uso eficiente del agua, mantenimiento de la red de riego y drenaje, aspectos ambientales, socio-económicos y de manejo. Marinus Bos (1997) describe grupos de indicadores. En general, no es recomendable utilizar todos los indicadores mencionados en cualquier circunstancia. El número de indicadores a utilizar depende del uso que se haga de la información generada (ej.: investigadores, administradores, tomadores de decisión), y de las disciplinas consideradas (balance hídrico, aspectos económicos, ambientales, y de gestión, etc.). Por ello se recomienda -cuando se quiere comparar el desempeño de algunos sistemas de riego con otros- seleccionar aquellos indicadores que resulten representativos de la variable que se quiere comparar o analizar.

El objetivo de este trabajo fue calibrar el modelo SIMGRO en el área regadía del río Mendoza. Luego de la calibración, se analizaron diferentes escenarios, como por ejemplo el impacto que podría llegar a producir el nuevo dique de embalse "Potrerillos" sobre la hidrología y el balance salino del área. El modelo SIMGRO también en este caso fue usado para calcular distintos indicadores de desempeño que permiten calificar los cambios que podrían producirse en la zona de riego.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO SIMGRO

El modelo SIMGRO simula el flujo de agua en la zona saturada, la zona insaturada y el agua libre superficial (Fig. 1). Tiene en cuenta los efectos del riego, drenaje y la extracción de agua subterránea así como su impacto sobre la evapotranspiración de los cultivos. También permite incluir prácticas de riego usadas en la zona. SIMGRO, puede ser usado en situaciones con condiciones hidrológicas cambiantes. Para una descripción más detallada, ver Querner (1988, 1997) y Kupper et al (2002). El modelo SIMGRO describe el flujo subterráneo del agua en un sistema de acuíferos multi-capas (estratificados). El flujo de agua subterránea saturado es modelado por medio del método de los elementos finitos, para lo cual cada sub-región es dividida en una red de puntos nodales. El flujo se considera Cuasi tri-dimensional (3-D), con movimiento horizontal del agua dentro de cada capa y flujos verticales entre las capas menos permeables (Fig. 1).

Los niveles del agua subterránea y los flujos son calculados para cada punto nodal. El sistema de agua superficial está constituido por los canales de riego por un lado y la red de drenaje por el otro (Querner, 1997). Es importante considerar el flujo de agua en los canales de riego, porque las pérdidas en los canales pasan a incrementar el agua subterránea. El modelo también considera el agua que fluye del suelo saturado hasta la red de drenaje, cuando esta es alcanzada por los niveles del agua freática.

En el modelo, se usan cuatro subsistemas para simular la interacción entre el agua superficial y subterránea, usando la resistencia al drenaje y la diferencia de niveles entre el agua subterránea y superficial (Ernst, 1978).

Como la parte subterránea reacciona a los cambios de nivel de agua mucho más lentamente que la parte de agua superficial, ambas tienen su propio intervalo de tiempo. El agua subterránea generalmente utiliza un día de intervalo, en el caso del agua superficial este valor es de 0,1 día (Querner 1997)

El transporte de sales solubles es considerado como transporte advectivo de materia no reactiva. En el modelo, esto ha sido integrado en cada módulo, basado en el balance hídrico calculado para cada compartimiento (Kupper et al., 2002). Este balance está ampliado con un balance salino, teniendo en cuenta las cantidades de agua y solutos disueltos. La zona insaturada ha sido dividida en un único compartimiento que contiene la zona de raíces y en varios de ellos por debajo de la zona de raíces, hasta alcanzar una distancia de 0,25 m por encima del nivel del agua freática. Cada nodo de la grilla de elementos finitos conforma un compartimiento para la zona saturada. El agua superficial, ha sido simplificada en el modelo como un único reservorio para la subregión.

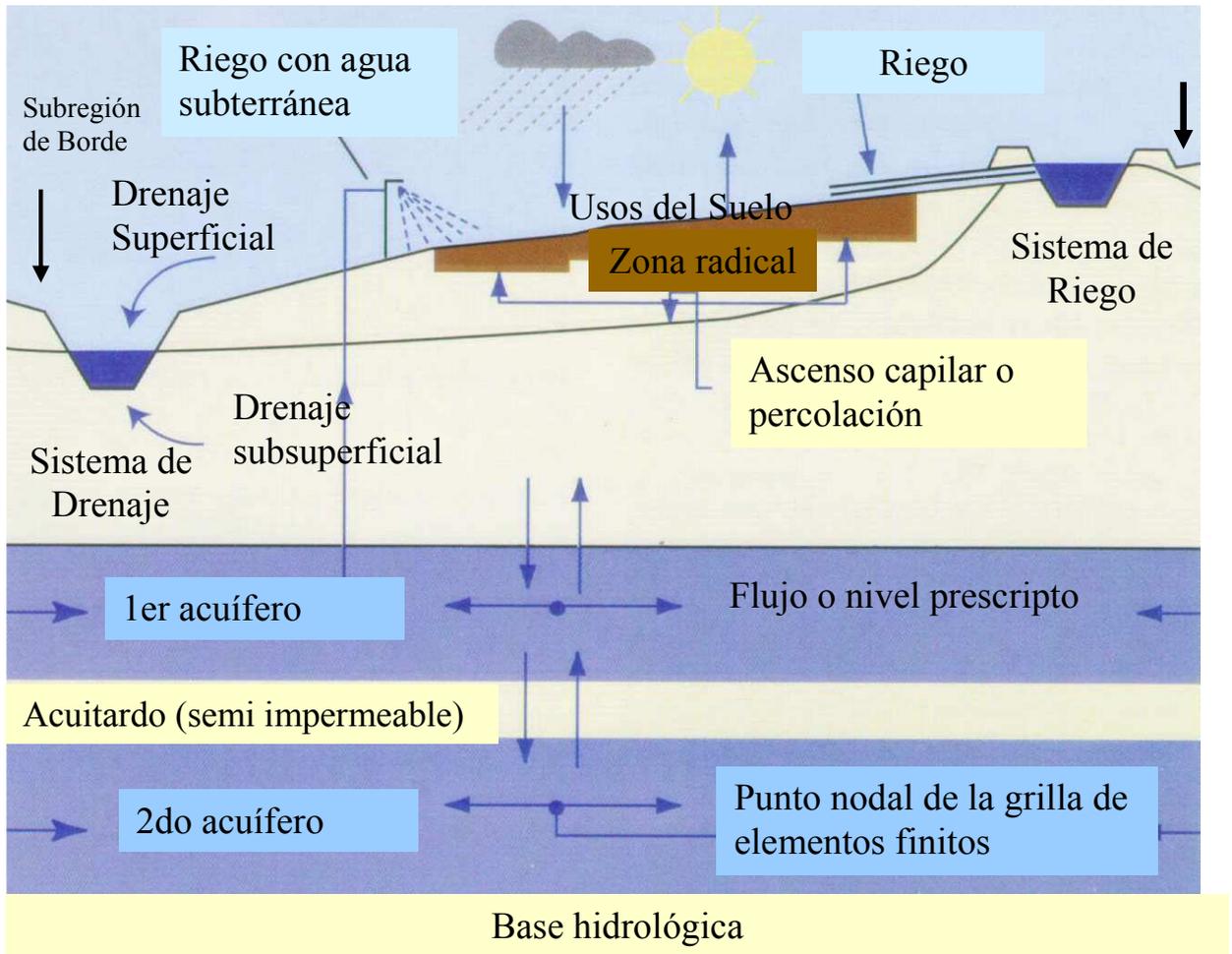


Figura 1: Esquema de modelación SIMGRO

DESCRIPCION DEL ÁREA REGADÍA DEL RÍO MENDOZA Y APLICACIÓN DEL MODELO.

Con sólo un área de 800 km², la cuenca del río Mendoza tiene más de 800.000 habitantes y contribuye con el 68 % del PBG, mientras que el 25% de esta agua es usada para usos domésticos e industrial. El modelo descentralizado y participativo de gestión –en vigor por más de 100 años– ha demostrado en ocasiones ser poco eficiente en términos de distribución de agua, mantenimiento de sistema de riego y drenaje y, sobre todo, control del uso de agua. La participación de los usuarios en actividades de gestión –antiguamente emblemático de la provincia– ha tenido momentos de gran disminución, y esta situación de insatisfacción, ha afectado temporalmente la pérdida de la autonomía financiera y la falta de eficiencia en la organización de las asociaciones de usuarios.

La reciente construcción de la presa de embalse Potrerillos sobre el río Mendoza ha permitido la regulación y programación de la entrega de agua a los usuarios en las seis áreas administrativas de riego.

Dada esta compleja situación, se vuelve indispensable un estudio de modelado de la cuenca del río Mendoza para idear una propuesta superadora del actual modelo de gestión y de posible crisis de sustentabilidad que está pronta a ocurrir en el oasis.

La altitud del área varía entre 578 y 1200 m sobre el nivel del mar. En las partes altas, los niveles freáticos son relativamente profundos y en las partes bajas éstos son poco profundos, resultando en excesiva saturación y salinización de los suelos. Las velocidades de infiltración de las series de suelos del área del río Mendoza son representativas de su origen aluvial se encuentran muy bajas, con valores extremos medidos de infiltración básica de 1,3 y 7,3 mm h⁻¹. La eficiencia de aplicación media del área es “pobre” (59%). La salinidad de suelo en la rizósfera de los cultivos regados varía desde 1,8 dS m⁻¹ (±1 dS m⁻¹) en las partes altas a 3,8 dS m⁻¹ (±1,9 dS m⁻¹) en las áreas bajas. El agua de riego tiene una conductividad eléctrica menor de 0,9 dS.m⁻¹ en el ingreso del área de proyecto. Y el agua de drenaje subsuperficial en la cola del sistema se encuentra en rangos de conductividad de 3,0 a 5,2 dS m⁻¹ (Morábito *et al.*, 2004).

Gran parte de la información hidrogeológica está basada en estudios representativos de extracciones del agua subterránea. Utilizando esos datos, la hidrogeología fue esquematizada como un sistema con tres acuíferos y dos acuitardos. La permeabilidad horizontal, resistencia vertical de acuitardos y la capacidad de almacenaje fueron estimados mediante ensayos de bombeo de perforaciones en los distintos niveles o capas de explotación de la cuenca.

De esos datos, la transmisibilidad en el área alcanza valores de 7000 m².día⁻¹ en el acuífero freático, de 120-5700 m².día⁻¹ en el primer acuífero confinado y de 240-7500 m².día⁻¹ para el segundo acuífero confinado. La resistencia vertical del primer acuitardo se encuentra en los 400 días, en algunos sectores puede ser tan bajo como 100 días a 4000 días en otros. El segundo acuitardo se lo considera más variable y se conocen resistencias verticales que van entre los 100 a los 6000 días, siendo el valor promedio de 700 días.

La red de elementos finitos está compuesta de 3.685 nodos, espaciados cada 1000 m, cubriendo un área de aproximadamente 327.000 ha. Los cultivos principales son vides, frutales, olivos, hortalizas de verano e invierno y pasturas. El área total cultivada bajo riego es cercana a las 100.000 ha. El área modelada se encuentra subdividida en 124 subregiones. Las subregiones son identificadas de acuerdo al área dominada por los canales de las seis diferentes unidades administrativas (subregiones 100 a 600); con posibilidad de riego de agua superficial y subterránea, con riego exclusivo de agua subterránea (subregiones identificadas como 700), las regadas con aguas residuales tratadas, Áreas de Cultivos Restringidos - ACRE - (subregiones 800) y las áreas no regadas (subregiones identificadas como 900).

Los caudales a la entrada de los principales canales de riego se obtuvieron de una base de datos para el período 1977-1997. En cuanto a las necesidades de los cultivos, las láminas de riego fueron calculadas por subregión y por mes (Morábito *et al.*, 2003).

De acuerdo con nuestros cálculos las láminas anuales usadas para riego en todos los cultivos varían entre 500 y 2.100 mm por año (con valor promedio de 740 mm por año). Las extracciones de agua subterránea para riego fueron realizadas del tercer y quinto nivel (este último con mejor calidad de agua), y fue estimada de acuerdo al balance de la cuenca (Hernández y Martinis, 2001). Debido al tamaño del área proyecto, los datos meteorológicos necesarios para la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) se utilizaron registros de cuatro estaciones meteorológicas (Fuerza Aérea Argentina, 2005). A cada subregión se le asignó una de las estaciones disponibles.

INDICADORES DE DESEMPEÑO UTILIZADOS

La Evapotranspiración Relativa (R_{ev}), definida como la relación entre la evapotranspiración actual y la evapotranspiración potencial, puede ser usada como un indicador de desempeño. Refleja qué valor alcanza la Evapotranspiración real y cuanto afecta el rendimiento del cultivo.

La Fracción de Consumo relaciona los parámetros o componentes del balance hídrico para un área irrigada -unos con otros- de manera tal que el administrador puede conocer la velocidad del cambio del nivel freático.

Si el nivel freático está cercano a la superficie, la información puede ser usada para evitar la anoxia de las plantas y el excesivo ascenso capilar (que no se puede despreciar si el agua freática es salina).

La fracción de consumo (D_F) por sus siglas en inglés, considera tres componentes para el balance hídrico de las áreas de riego. Relaciona la evapotranspiración actual a la suma de toda la precipitación más el agua de riego superficial y subterránea. Fue definida como (Molden, 1997; Bastiaanssen *et al.*, 2001):

$$D_F = \frac{ET_{actual}}{P + V_c} \quad (1)$$

ET_{actual} = evapotranspiración actual de cultivos regados
P = precipitación
Vc = volumen de agua de riego superficial y subterránea

A primera vista, la fracción consumida se confunde con el indicador “relación de consumo total”, pero esta relación utiliza la evapotranspiración potencial.

Muchos de los impactos ambientales negativos del riego se relacionan con la razón de cambio o variación de la profundidad del nivel freático. Debido a un drenaje ineficiente o al retraso en la construcción de un sistema de drenaje, en comparación con la infraestructura disponible para el agua superficial, el nivel freático asciende a menudo hacia la rizósfera de los cultivos regados.

En regiones semiáridas esto a menudo conduce a un incremento del ascenso capilar por sobre la percolación profunda, resultando en un aumento de la salinidad del suelo superficial. Si el agua subterránea bombeada para riego excede la recarga del acuífero, se provoca el descenso de los niveles de agua subterránea. Teniendo como resultado, que los costos de energía para bombeo se incrementen de manera que el agua se vuelve más costosa.

CALIBRACIÓN DEL MODELO

En cuanto a comparar lo calculado con lo observado, el modelo fue corrido varias veces para diferentes momentos, usando cinco años de datos meteorológicos, y luego se compararon los resultados. La diferencia entre lo observado y los valores calculados podrían ser mejorados por la detallada esquematización de la zona saturada (red de elementos finitos). El modelo fue calibrado usando niveles de agua subterránea, evapotranspiración, y salinidad del agua y suelo para la temporada 1994/95. Para ver la evapotranspiración calculada fue comparada con datos observados de evapotranspiración actual mensual para viñedos ubicados en la Estación Experimental del INTA Luján. Al compararlos se puede ver que la evapotranspiración calculada por el modelo SIMGRO fue consistente con los valores observados en el comienzo de la temporada (principalmente septiembre-diciembre) sin embargo, la evapotranspiración calculada fue de 10–15 mm mes^{-1} menor que la observada. Durante el verano (enero-abril) la diferencia de ET fue 20 mm más baja.

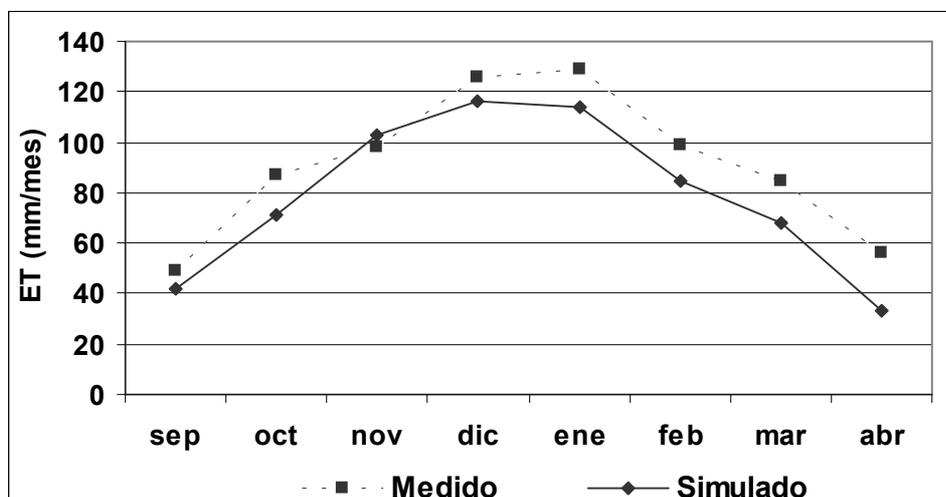


Figura 2: Evapotranspiración (ETc) de la Vid medida y simulada para la subregión 403

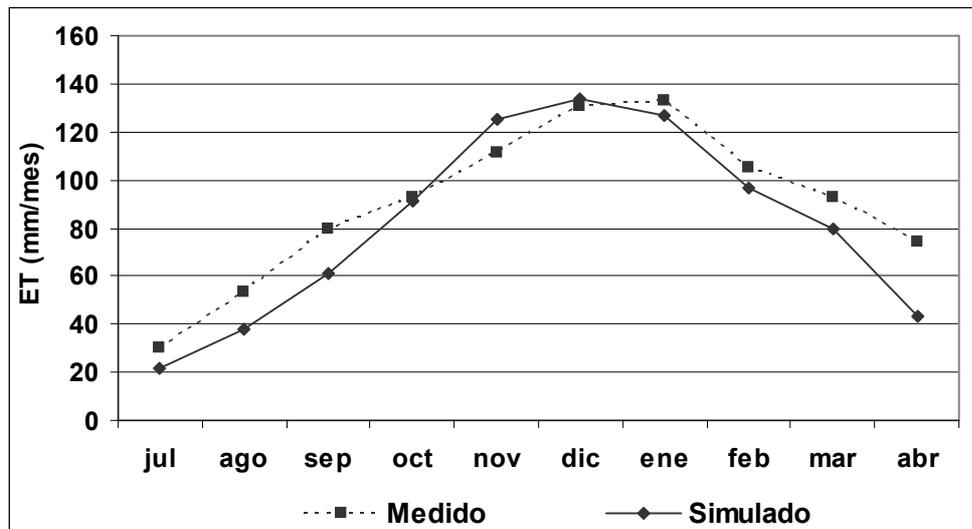


Figura 3: Evapotranspiración (ETc) del olivo medida y simulada para la subregión 403

Los niveles de agua subterránea calculados con SIMGRO fueron comparados con los niveles de agua subterránea medidos. Como comparación es un buen indicador de la precisión del modelo en describir la interacción del riego y el drenaje con el sistema de acuíferos. Los niveles calculados de agua subterránea mostraron una pequeña diferencia relativa con los valores observados. Las diferencias entre los niveles de agua subterránea medidos y calculados se encuentran en el orden de -0.5 a -2 m.

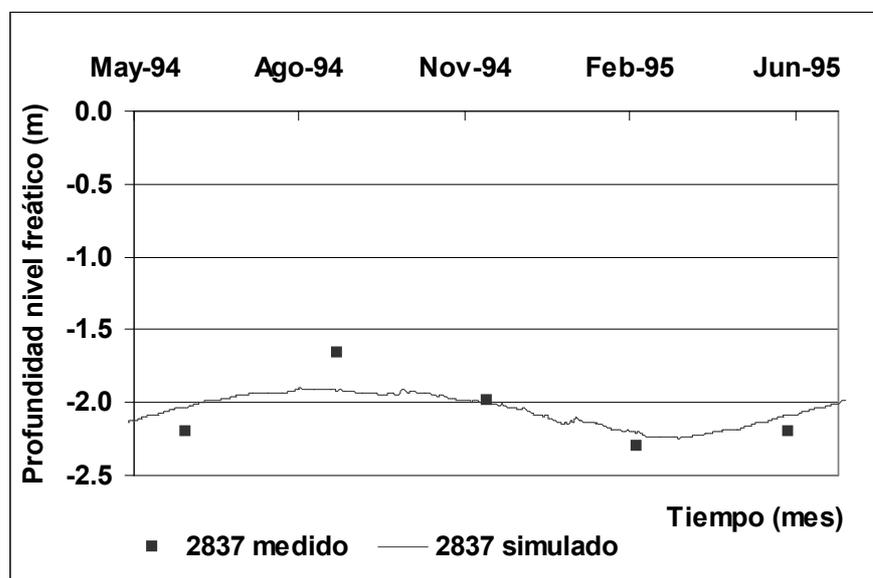


Figura 4: Profundidad del nivel freático medida y simulado para el nodo 2837 la subregión 501

La conductividad eléctrica (EC) del agua de drenaje subsuperficial se midió en (7) lugares de la red de drenajes abiertos durante el período 2002-2004 y también se midió la salinidad del agua subterránea en los niveles 3 y 5 (Morábito et al., 2003, 2004). El modelo estimó EC para diferentes lugares y acuíferos

bastante bien. Las diferencias entre la EC medida y la calculada es de 0.1 a 1.0 dS m⁻¹.

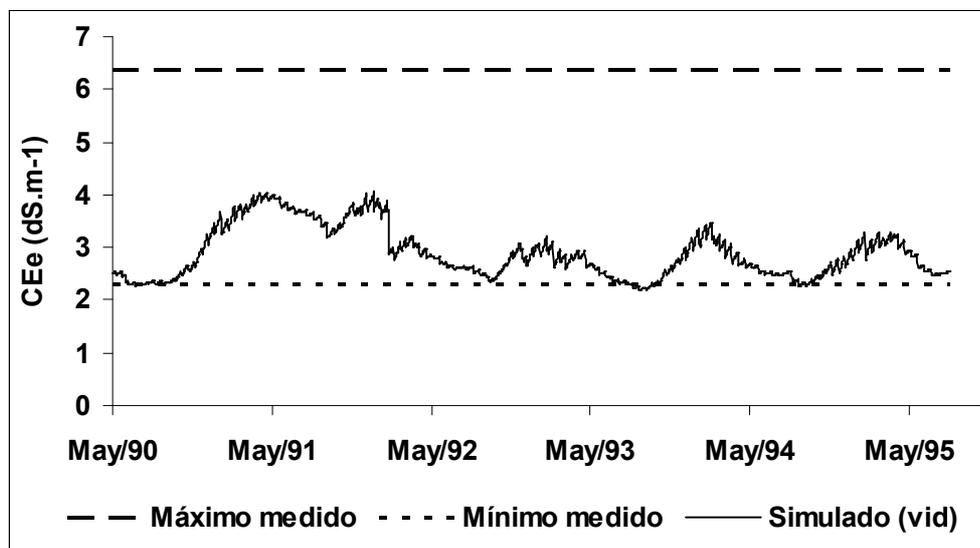


Figura 5: Comparación entre la salinidad de la rizósfera de un cultivo de vid simulado y los datos (máximo y mínimo medidos a campo) para la subregión 408.

RESULTADOS DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO

La cantidad total de agua destinada al riego y la ET_{actual} no es totalmente independiente una de otra. Siempre que exista suficiente agua para riego, la ET_{actual} será muy cercana a los valores de la potencial. En la figura 5 se muestra la “ET Relativa” (R_{ET}) para los cultivos en la subregión 104 (zona alta del área de riego del río Mendoza). La figura muestra valores medios de 0.75, pero en el verano (enero-abril) la R_{ET} es más baja. Esto indica que la escasez de agua podría traducirse en una reducción de rendimiento de los cultivos debida a la mal asignación del agua.

Las subregiones identificadas como 400 tienen altos valores de R_{ET} con respecto a la fracción de consumo para las subregiones 400 y 500, las fluctuaciones de la freática se producen muy cercanas a la zona de raíces; y en este caso la fracción de consumo puede ser un indicador más útil. La Figura 6 muestra que si los valores de la fracción de consumo exceden de 0.6, el volumen de agua almacenado en el área disminuye. Parte de esa disminución se debe al drenaje natural y otra parte al ascenso capilar hacia la zona de raíces de los cultivos. Para la mayoría de los cultivos, una disminución de ET por debajo de 25% resultaría en altos rendimientos del cultivo por metro cúbico de agua (Bos, 2004). Sin embargo el rendimiento por hectárea, así como los ingresos del agricultor. Si las condiciones de borde son tales que el valor promedio anual de la fracción de consumo es más bajo que la intersección con valores críticos, entonces la freática ascendería cada año, a menos que se mejore o instale un sistema de drenaje artificial.

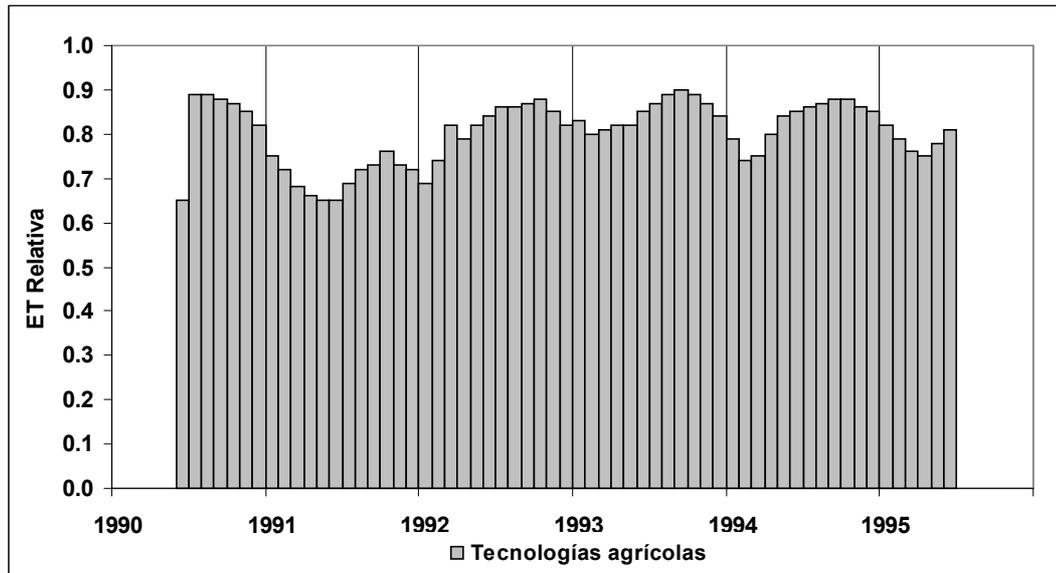


Figura 6: evapotranspiración relativa de tecnologías agrícolas para la subregión 408

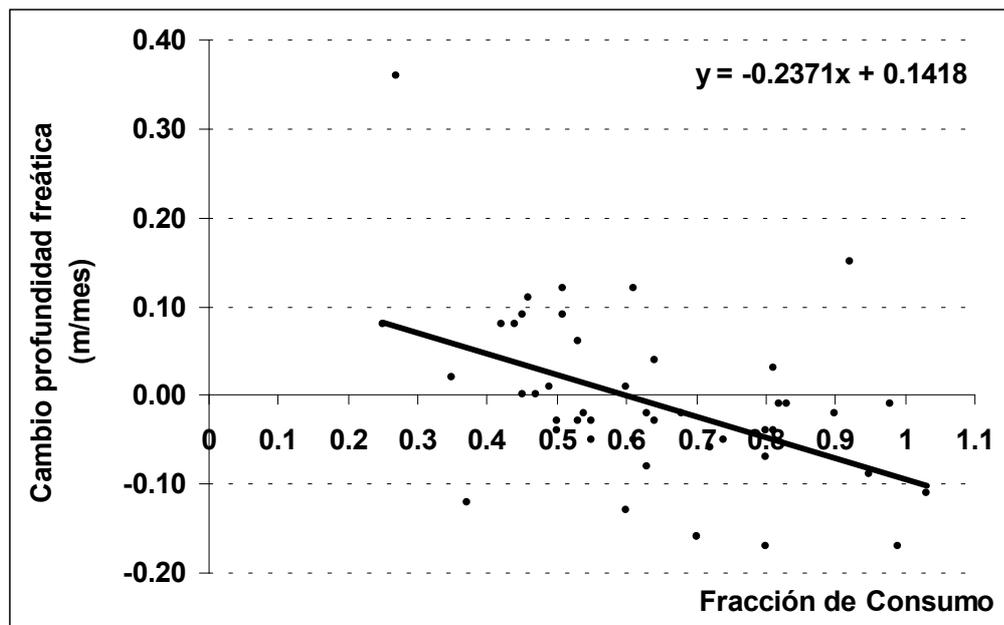


Figura 7: velocidad de cambio del nivel freático como función de la fracción de consumo para la subregión 400

ANÁLISIS DE ESCENARIOS

El agua distribuida a lo largo de todo el sistema de riego del río Mendoza contiene una cantidad de sedimentos en suspensión (limo y arcillas), dependiendo del derrame del río, que contribuyen a impermeabilizar las paredes de los canales de riego y disminuir las pérdidas de agua. Esta situación se considera como la situación de referencia (escenario 0 = S_0).

Debido a la construcción del Dique Embalse Potrerillos, una gran porción de los sedimentos quedará en el embalse. El agua de los canales de riego contendrá menos material en suspensión y, por tanto la infiltración en el lecho

del río y en los canales de riego aumentará (20 y 17%, respectivamente). El ascenso de los niveles freáticos causarán otros efectos secundarios, como cambios en la eficiencia de riego, ascenso capilar, evapotranspiración actual, etc. La situación con el embalse funcionando ha sido considerada como el escenario 1 ($S = 1$). Utilizando el SIMGRO, modelamos esta nueva situación. Los efectos de erosión, que pueden ocurrir en los canales como consecuencia de las fuerzas erosivas del agua clara, no fueron considerados.

En cuanto a los resultados del nuevo escenario (S1), los mismos fueron comparados con el escenario de referencia (Fig. 5). En S1 hay una importante reducción de la ET_{actual} y una más alta salinidad (EC) en la rizósfera, y como consecuencia se reducirá el rendimiento potencial del cultivo en la zona.

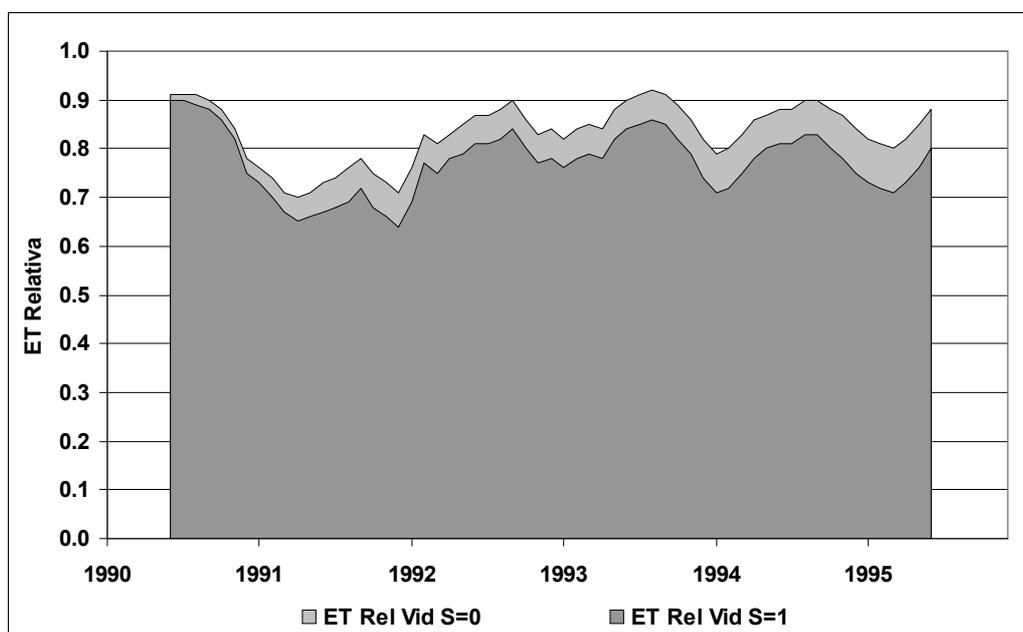


Figura 8: Evapotranspiración relativa de vid para la subregión 408 (S0, situación actual y S1, nuevo escenario)

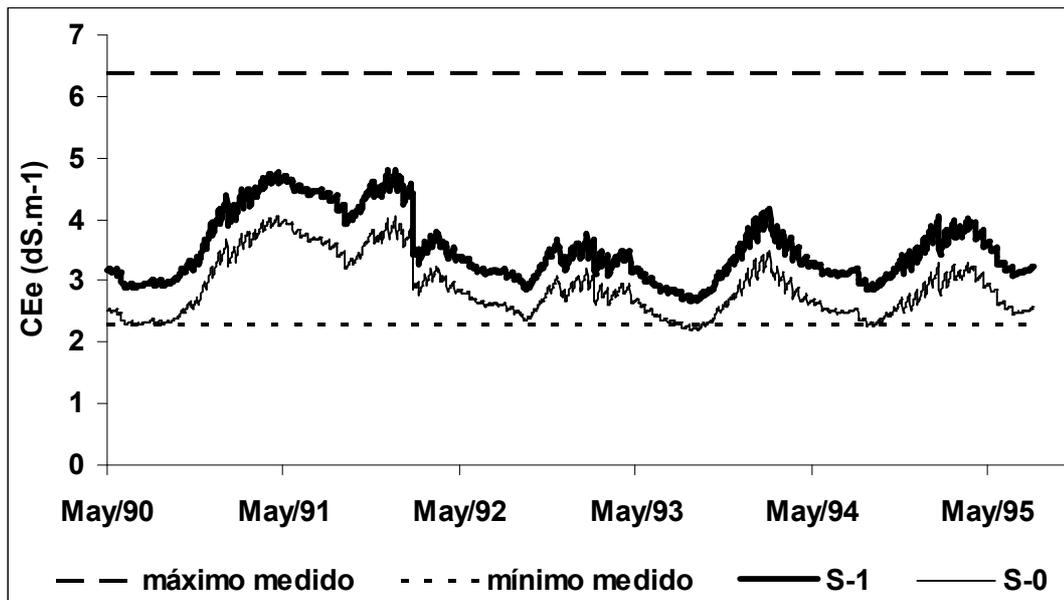


Figura 9: Aumento de la salinidad del extracto de saturación del suelo respecto de la situación de referencia en la Subregión 408 (S0, situación actual y S1, nuevo escenario)

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La ventaja de un modelo con buena base física como el caso del modelo SIMGRO, es que constituye una herramienta para evaluar y tomar decisiones, y que pueden ser usados en situaciones donde cambian las condiciones que afectan el sistema hidrológico. Las prácticas de riego pueden ser simuladas para un número de años con cambios en las condiciones meteorológicas y de láminas de riego.

Sobre la base del estudio, estamos seguros que un incremento en las pérdidas por infiltración en el lecho del río y en los canales resultará en una menor cantidad de agua superficial de riego con una elevación de los niveles del agua subterránea. De acuerdo con los resultados de nuestro modelo, en las partes bajas de la cuenca, se observará un incremento significativo de la salinidad en la zona de raíces y en el acuífero freático. Las acciones futuras deberían evaluar el efecto de una mejor distribución del agua por la red de riego y evitar una mayor extracción de agua subterránea cuando hay escasez de agua

REFERENCIAS

- Allen, R., L. Pereira, D. Raes & M. Smith (1998) “Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements”. FAO, Irrigation and Drainage paper 56. Rome, Italy.
- Bastiaanssen, W. G., R. A. L. Brito, M. Bos, R. Souza, E. Cavalcanti & M. M. Bakker (2001) “Low cost satellite data applied to performance monitoring of the Nilo Coelho irrigation scheme, Brazil”. Irrigation and Drainage Systems 15(1), 53–79.
- Bos, M. (1997) “Performance indicator for irrigation and drainage”. Irrigation and Drainage Systems 11, 119–137.
- Bos, M. (2004) “Using the depleted fraction to manage the groundwater table in irrigated areas.” Personal interview. International Institute for Land Reclamation and Improvement (Alterra-ILRI), Wageningen, The Netherlands.

- Ernst, L. F.** (1978) “*Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables*”. *J. Hydrol.* 39(3/4), 1–50.
- Fuerza Aérea Argentina**, Comando de Regiones Aéreas, Servicio Meteorológico Nacional, Centro de Información Meteorológica. (2005) Base de datos meteorológicos, Buenos Aires, Argentina. cim@meteofa.mil.ar.
- Hernández, J. & N. Martinis** (2001) *Modernización del manejo de los recursos hídricos. Agua subterránea. Cuenca del río Mendoza y Tunuyán inferior*. Mendoza, Argentina. FAO-DGI.
- Kupper, E., E. P. Querner, J. A. Morábito & M. Menenti** (2002) “*Using the SIMGRO regional hydrological model to evaluate salinity control measures in an irrigation area*”. *Agric. Water Manage.* 56, 1–15.
- Molden, D. J.** (1997) *Accounting for water use and productivity*. WIM paper 1, International Water Management Institute (IWMI). Colorado, Sri Lanka.
- Morábito, J., J. Hernández, M. Manzanera, N. Martinis, C. Mirábile, P. Pizzuolo, & S. Salatino** (2003) *Modelación hidrológica de la cuenca norte de Mendoza*. 1er Informe. Volúmenes de agua distribuidos en la red de canales del río Mendoza, serie: 77–97. INA-CRA. Argentina.
- Morábito J., S. Salatino, R. Medina, M. Zimmermann, M. Filippini, A. Bermejillo, N. Nacif, S. Campos, C. Dediol, D. Genovese, P. Pizzuolo & L. Mastrantonio** (2004) *Evaluación de la calidad del agua en el área regadía del río Mendoza, Argentina*. INA–SECyT UNCuyo, Argentina.
- Oriolani, M.** (1987): *Requerimiento hídrico de los cultivos*. INTA, Mendoza (Argentina).
- Querner, E. P.** (1988) *Description of a regional groundwater flow model SIMGRO and some applications*. *Agric. Water Manage.* 14, 209–218.
- Querner, E. P.** (1997) *Description and application of the combined surface and groundwater flow model MOGROW*. *J. Hydrol.* 192, 158–188.