

# Evaluación del comportamiento del acuífero del Alto Valle de Río Negro para control de heladas en un distrito de riego

*Gabriela Polla<sup>1</sup>, Javier Pavese<sup>2</sup>, Maite Elissalde<sup>1</sup> y Federico Horne<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Facultad de Cs. Agrarias (UNComahue), Ruta 151, km 12.5, (8303) Cinco Saltos, Río Negro, Argentina.

<sup>2</sup> Dpto de Matemática. (F.A.E.A.- UNComahue), Buenos Aires 1400, (8300) Neuquén, Neuquén, Argentina.

Mail de contacto: [gabipolla@yahoo.com.ar](mailto:gabipolla@yahoo.com.ar)

---

## RESUMEN

El sistema productivo Alto Valle de Río Negro, incluye 50000 ha de cultivos frutícolas de carozo y pepita. Una de las restricciones del sistema son las heladas que afectan a los frutales de floración temprana, con pérdidas económicas que alcanzan porcentajes significativos. Los métodos de protección requieren de agua para riego presurizado con láminas de 3 -5 mm/hora durante 8 horas, que son provistas por bombeo del acuífero. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la factibilidad del control de heladas a través del riego presurizado, en función de las características hidrogeológicas del acuífero, sus condiciones de contorno y la recarga estacional por riego. Para alcanzar este objetivo se utilizó el modelo numérico denominado Modflow, el que fue sometido a diferentes escenarios. Entre las principales conclusiones se puede mencionar que es posible la protección de heladas por riego presurizado en aproximadamente un tercio del área del Distrito. Palabras clave: heladas tardías, modelo matemático, acuífero.

---

## ABSTRACT

The production system Upper Rio Negro Valley, includes 50000 ha. of fruit crops, mainly apples, pears, peaches, plums and vineyards. One of the constraints of the system is the frost affecting early flowering fruit trees, with economic losses reaching significant proportions. Protection methods required pressurized irrigation water with sheets of 3 -5 mm / hour for 8 hours, which are supplied by pumping from the aquifer. The aim of this study is to evaluate the feasibility of frost control through pressurized irrigation, depending on the hydrogeological characteristics of the aquifer, its boundary conditions and seasonal recharge by irrigation. To achieve this goal we used the numerical model called Modflow, which was subjected to different scenarios.

Among the key findings can be mentioned that it is possible frost protection by pressurized irrigation in about one third of the area of the District.

Keywords: frost protection, mathematical model, aquifer.

---

## Introducción

El Alto Valle de Río Negro es una unidad económico-productiva, compartida entre la Provincia de Neuquén y Río Negro. Se trata de un valle ubicado en el lugar en que la confluencia de los ríos Neuquén y Limay, da origen al río Negro. Sus caudales módulos, de 320 y 650 m<sup>3</sup>/s respectivamente, son aprovechados para irrigar todo el valle a través de un dique nivelador sobre el Río Neuquén (ubicado en Barda del Medio) y su red intensiva de canales.

Entre los cultivos destacados, los frutales ocupan los primeros lugares. La manzana, número uno de la actividad regional, a la que ha dado renombre. El cultivo de la pera se asemeja al de la manzana. Su cuantía, sin embargo, es muy inferior, aunque sus porcentajes respecto

de la producción total del país y de la exportación, son similares a los de la manzana.

Entre los principales problemas que posee el área se puede mencionar la ocurrencia de heladas primaverales (tardías) en el momento que los árboles frutales comienzan a brotar y florecer, evento que produce importantes pérdidas económicas, al afectar la calidad y la cantidad de la producción frutícola.

Uno de los métodos utilizados para la defensa contra heladas, son los sistemas de riego por aspersión. Ellos permiten la liberación del calor latente del agua al cambiar del estado líquido al sólido. Para aplicar este método es necesario contar con agua suficiente durante el tiempo que dure la helada, recurso que es extraído del acuífero.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la factibilidad del control de heladas a través del riego presurizado, en función de las

características hidrogeológicas del acuífero, sus condiciones de contorno y de la recarga estacional por riego.

Hasta el momento en la zona no se ha aplicado un modelo numérico de agua subterránea para analizar los objetivos presentados en este trabajo.

## **Materiales y Métodos**

El Alto Valle de Río Negro es una extensa zona de agricultura bajo riego ubicado en el extremo oeste de la provincia de Río Negro con una superficie cercana a las 50.000 has.

La actividad frutícola representa el 70 % del producto bruto sectorial, y su desarrollo esta condicionado a la existencia de un sistema de riego que permite satisfacer sus demandas.

El clima de la región es continental, templado y árido con temperatura media anual de 15 °C, las necesidades de frío invernal de los frutales de hojas caducas son normalmente satisfechas en esta región. La precipitación media anual es 190 mm, con una evapotranspiración media anual de aproximadamente 900 mm, dato estimado a través de la fórmula de Penmann-Monthei (FAO, 2006)

En particular el trabajo se realizó sobre el Distrito de Cinco Saltos, de aproximadamente 3000 ha de extensión y ubicado en el extremo superior del Alto Valle de Río Negro, área que posee características similares al resto del Valle.

El acuífero esta constituido por dos niveles: uno inferior de material grueso formado por gravas y arenas sin cementar, y uno superior de material más fino que forma el suelo, con un espesor promedio de dos metros que puede estar parcialmente saturado en los períodos de ascenso del nivel freático. Los suelos de la planicie de inundación ocupan los albardones suaves, son suelos profundos, moderadamente bien drenados, franco limoso a franco limo-arcilloso, contienen materia orgánica, buena retención de agua, y conforman los suelos más productivos del valle.

El estrato superior posee una conductividad hidráulica (K) del orden de 0,5 m/día a 4 m/día, varias veces menor que la del horizonte inferior que no semiconfina al acuífero freático. Los valores de la conductividad hidráulica del estrato inferior varían entre 20 a 90 m/día, correspondiendo los valores mayores a la zona cercana al río. Los valores del coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico, oscilan entre 5% a 30 %, lo cual califica al acuífero como libre. (Estudio Integral del Río Negro, 1987)

El acuífero en estudio corresponde al grupo Neuquén (Cretácico Superior). Dentro de la descripción geológica se distinguen dos estratos: el hidroapoyo que constituye un homoclinal subhorizontal con suave inclinación noreste a suroeste, constituido por capas alternantes de areniscas y pelitas de resistencia mecánica diferencial. Esta formación presenta baja permeabilidad, muy inferior a las de las capas superiores. La formación no tiene importantes accidentes de relieve, posee una geomorfología plana con una inclinación que acompaña la pendiente promedio del río. Se contó con información de la variación espacial del espesor del acuífero. (Estudio Integral del Río Negro, 1987)

Para implementar el modelo se dispuso de información de lecturas freáticas del Distrito de Cinco Saltos, período 2008-2010. Dicha información incluye: nombre del freático, coordenadas, cota terreno, y profundidad de la freática en intervalos semanales, mostrado en la Fig. 1.

Se dispuso de una Imagen SPOT Merge del año 1995 georeferenciada en Gauss Kruger Faja 2 Datum Campo Inchauspe 1969 con una resolución de 10 m. Dicha información fue proporcionada por la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas de los Ríos Neuquén, Limay y Negro (AIC).

De trabajos previos de la zona de estudio se obtuvo la siguiente información: dotación de riego anual en promedio 1400 mm/año, distribuida uniformemente a lo largo del año. (Stangaferro S. et. al. 2011)

Tassara en el año 2005, analizó el efecto y características de las heladas producidas en el Alto Valle, como así también las necesidades hídricas para su control mediante métodos de dispersión.

Para el análisis del sistema río-acuífero se utilizó el modelo numérico MODFLOW, uno de los modelos 3-D de flujo de aguas subterráneas más populares del mundo, desarrollado por Michael McDonald y Arlen Harbaugh para el Servicio Geológico de los EE.UU. La versión usada para este trabajo es la 4.5.

Este modelo consiste en una representación virtual del medio físico en un ordenador, que mediante operaciones adecuadas, calculará la evolución de los niveles y el flujo hídrico producido en condiciones especificadas, pudiendo incorporarse bombeos de pozos, inyecciones, recarga distribuida en superficie, evapotranspiración, flujo hacia drenes y flujo a través del lecho de los ríos. Simula el flujo del agua subterránea en tres dimensiones en una cuenca hidrogeológica.

El flujo de agua de densidad constante en tres dimensiones en un medio poroso saturado, heterogéneo y anisótropo que cumple con la ley de Darcy puede ser descrito por la Ecuación 1

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{xx} \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{yy} \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_{zz} \cdot h \cdot \frac{\partial h}{\partial z}) \pm Q(x, y, z) = S \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

donde  $Q(x, y, z, t)$  es la entrada neta al sistema ( $m^3/s$ );  $S$  es el coeficiente de almacenamiento;  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$  son las conductividades hidráulicas en cada dirección ( $m^2/d$ );  $h(x, y, z, t)$  es la variable de estado (cota del nivel de agua (m)), es una medida de la carga hidráulica ( $h$ ) en cada punto del medio saturado).

En el caso de acuíferos confinados y semiconfinados,  $h$  representa no sólo la altura real de agua, sino también la altura debida a la presión de alojamiento.

Excepto en casos muy simples no existen soluciones analíticas de esta ecuación. En consecuencia se usan otros métodos numéricos. El programa MODFLOW utiliza el método numérico de diferencias finitas, donde se sustituye el sistema continuo por un conjunto finito y discreto de puntos en el espacio y tiempo, y sustituye las derivadas parciales por diferencias de valores de la función  $h$  en distintos puntos. Su solución da como resultado el valor de la altura freática en los puntos especificados, lo que constituye una aproximación a la distribución continua que daría una solución analítica de la ecuación diferencial.

### Implementación del modelo

Sobre la imagen SPOT georeferenciada del distrito de Cinco Saltos, se determinó una malla con una cuadrícula de 50m por 50 m, con el objetivo de poder representar los distintos componentes de un Distrito de Riego (canales, desagües, etc) así como también precisar la ubicación de los pozos de bombeo que se utilizarán para el control de heladas. Se considero para una primera corrida valores de conductividades hidráulicas de  $K_x = K_y = 40$  m/d y  $k_z = 0.4$  m/d; para toda el área.

Vistas las características geológicas anteriormente mencionadas, se eligió trabajar con una sola división o capa en el acuífero, ya que los datos analizados indican que la fluctuación de la freática, durante el periodo sin riego, se realiza en la capa inferior del acuífero.

Se considero un espesor del acuífero variable de este a oeste, con valores que oscilan en 6 m en la cercanía de la barda, de 9

m en la zona media (desde la barda al río) y de 12 m adyacente al río.

Se estableció como altura máxima de terreno en el límite norte del área de estudio 300 msnm (metros sobre el nivel del mar) y mínima, en el sur de 276 msnm

El tramo del Río Neuquén que se encuentra en la zona de estudio posee un recorrido de aproximadamente 25 Km, con anchos que varían entre 40 y 90 m, se modeló para un caudal de  $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  y sus correspondientes alturas hidrométricas. El programa Modflow calcula la conductancia del río en cada tramo teniendo en cuenta los siguientes parámetros en forma directa: conductividad hidráulica en la dirección  $z$  de los sedimentos del río (estimado en  $0,04 \text{ m}^2/d$ ), ancho del río ingresado y longitud de la celda; e inversamente proporcional al espesor de los sedimentos del lecho del río, estimados en 0,15 m.

Se supuso una recarga efectiva neta de 500 mm/año.

Las condiciones de borde establecidas fueron, en el límite norte y este, una formación llamada localmente "bardas" de flujo nulo, el límite oeste con condición de borde río y al sur no se incluyó condición de borde.

Se puede considerar que la interacción entre el río y el acuífero es permanente.

El modelo regula si el río alimenta al acuífero o viceversa según las alturas de la freática y el nivel del río. Esto se hace a través de una ecuación de acople propia del modelo.

La Fig. 1 muestra el área de estudio.

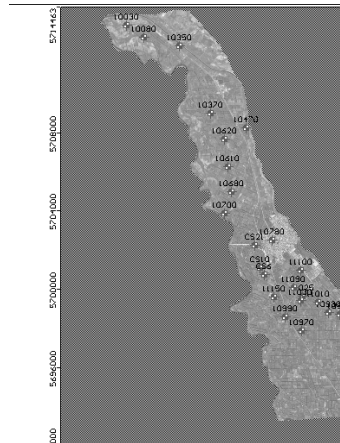
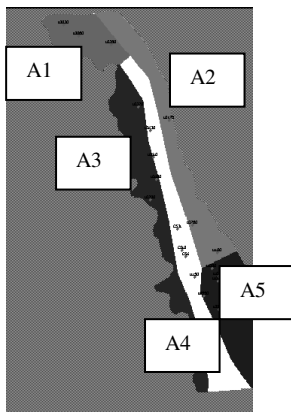


Figura 1. Esquema del Distrito de Cinco Saltos, pozos de observación.

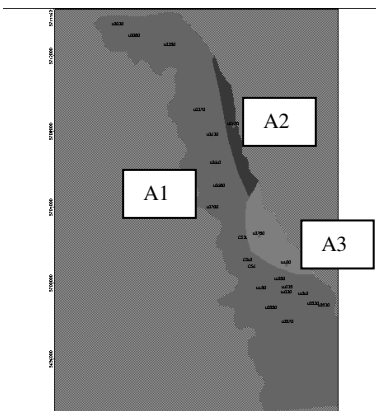
## Resultados y discusión

La calibración se realizó en régimen permanente y los resultados fueron comparados con los registros del mes de agosto del año 2008. Los parámetros que más sensibilidad mostraron fueron la conductividad hidráulica y la recarga. El mejor ajuste del modelo se obtuvo con los valores que se muestran en las Fig. 2 y Fig. 3.



**Figura 2.** Distribución espacial de la conductividad hidráulica: A1: 60 m/d, A2: 45 m/d, A3: 85 m/d, A4: 50 m/d, A5: 20 m/d.

La Fig. 3 muestra la distribución espacial de la recarga efectiva, siendo la recarga efectiva la suma entre la precipitaciones y el riego menos la evapotranspiración, en todos los casos los valores son anuales.

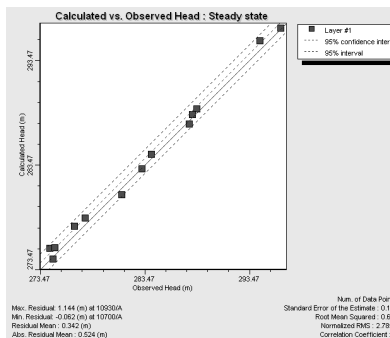


**Figura 3.** Distribución espacial de la recarga efectiva: A1: 400 mm, A2: 100 mm, A3: 0 mm.

La zona de nula o baja recarga efectiva se corresponde con áreas urbano-rural con servicio de cloacas.

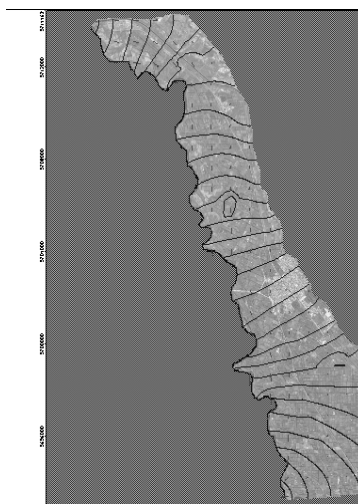
La Fig. 4 muestra como los valores calculados versus los observados se aproximan a una recta a 45°, con un error estándar estimado de aproximadamente 14 cm, siendo los puntos ubicados en la parte central del gráfico los correspondientes al área de estudio propiamente dicha.

Se realizaron validaciones para los años 2009-2010 con los valores de los parámetros encontrados y se obtuvieron ajustes similares.



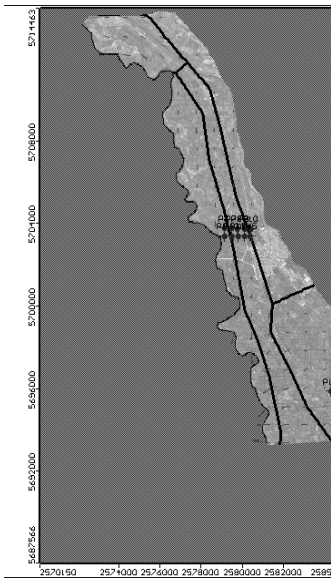
**Figura 4.** Calibración del modelo.

En la Fig. 5 se muestra el mapa de isohipsas y vectores de flujo obtenido de la calibración.



**Figura 5.** Isohispas y vectores de flujo agosto-2008.

Dado que el objetivo del trabajo fue analizar el comportamiento del acuífero sometido a una extracción intensiva de agua (extracción de un gran volumen de agua en toda el área del acuífero en un mismo período de tiempo), para control activo de heladas, se propuso una batería de 10 pozos ubicada en el Distrito de Cinco Saltos, con características hidrogeológicas diferenciables. Dicha conformación se muestra en la Fig 6.



**Figura 6.** Batería de pozos.

Para el diseño de la batería de pozos se consideró que la zona extractiva (rango de profundidades donde se extraerá el agua), se encuentra entre 1.5 y 6 m de profundidad, abatimiento máximo admitido 4.5 m para que no existan problemas de cavitación. El distanciamiento entre pozos será de 350 m valor estimado a partir de la fórmula de Jacob, este valor de distanciamiento permite que los conos de abatimiento entre pozos no se intercepten, asegurando así que no aumente su descenso.

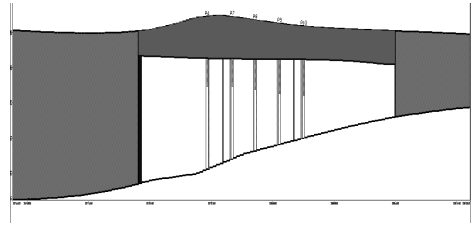
El caudal de 3000 m<sup>3</sup>/d se obtuvo a partir de las perforaciones de la zona, ensayos de bombeos y estimaciones analíticas la fórmula de Theis y se considera técnicamente factible de extraer.

Con este criterio habrá un pozo cada 12 ha aproximadamente y con el caudal extraído se podrá regar de 4 a 5 ha en promedio.

Se simuló una helada crítica de 3 noches consecutivas, en régimen transitorio, regando 8

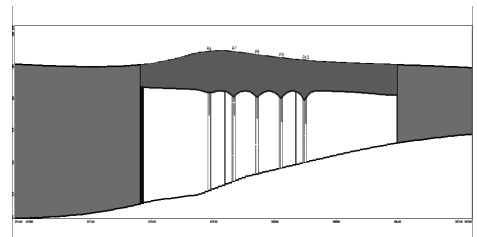
hs y dejando recuperar el acuífero durante las 16 hs restantes, manteniendo ese patrón durante 3 días.

La Fig. 7 corresponde a un corte transversal con dirección este –oeste, de la batería de pozos donde se observa el acuífero en estado de equilibrio hidrodinámico, modelado en estado permanente y antes de realizar la extracción de agua.



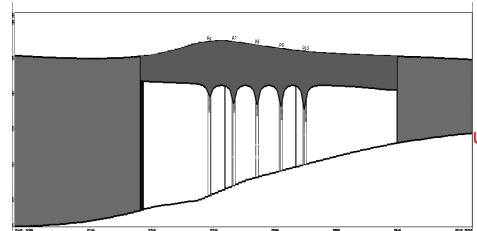
**Figura 7.** Corte transversal sobre batería de pozos.

La Fig. 8 ilustra la situación del acuífero anterior en un entretiempo de recuperación, luego de bombear 8 hs.



**Figura 8.** Corte transversal sobre batería de pozo en entretiempo de recuperación del acuífero.

En la Fig. 9 muestra el mismo corte transversal al finalizar el tercer día de bombeo.



**Figura 9.** Corte transversal sobre batería de pozos al tercer día del bombeo.

Del análisis de la modelación se infiere que es posible la protección contra heladas para una equidistancia entre pozos de 350m, donde cada

uno tiene un área de influencia de aproximadamente 12 ha, pero el caudal extractivo solo alcanza para proteger 4.5 ha.

## Conclusiones

El modelo utilizado representó adecuadamente la hidrodinámica del acuífero.

Los parámetros más sensibles en la calibración fueron la conductividad hidráulica y la recarga al acuífero.

A partir del diseño propuesto, se puede proteger aproximadamente un tercio del área total del Distrito.

En todo el Distrito de Cinco Saltos, cada pozo acepta una extracción de 3000 m<sup>3</sup>/d, con una equidistancia de 350m.

## Referencias

- Administración Pcial. Del Agua (A.PA.)1984. Estudio Hidrológico y Drenaje Area de riego Centenario. *Informe Técnico*. Neuquén.
- Batty, M. 1979. On planning processes. En: B Goodall y A. Kirby (eds.), *Resources and planning*. Pergamon Press. Oxford. 17-45.
- Estudio Integral del Río Negro. Convenio Agua y Energía Eléctrica –Prov. Río Negro. 1987. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Sector drenaje. Informe Final. Tomo I". *CIL- Consorcio Inconas-Latinoconsult*. Río Negro.
- Estudio FAO. Riego y Drenaje 56. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. ISSN 0254-5293.
- McDonald, M. y Harbaugh, W.1988. "Modflow"—A Modular 3-climensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. US Geological Survey.
- Stangaferro, S., Polla, G., Horne, F. Y Pavese, J. 2011. Modelo Hidrológico conceptual del acuífero Alto Valle de Río Negro. *VII Congreso Argentino de Hidrogeología*. ISBN 978-987-23936-8-7. l:124-131. Salta.
- Tassara, M. 2005. Defensa contra heladas. *Revista: Fruticultura y Diversificación*. Año 11. Nro 45. l: 20-24. Edición Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Gral. Roca.