

10

Caracterización hidrogeológica y modelación preliminar del flujo subterráneo en la cuenca baja del río Limay, provincia de Neuquén (Argentina)

Hydrogeological characterization and preliminary groundwater flow modeling in the Limay River lower basin, Province of Neuquen (Argentina)

P. LAURENCENA,¹ E. KRUSE,² J. MAS-PLA³

¹ Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, La Plata

² Universidad Nacional de La Plata, CONICET, La Plata

³ Universitat de Girona, Girona

Resumen: En este trabajo se caracteriza hidrogeológicamente la llanura aluvial del río Limay (Argentina) y se formula un modelo conceptual de comportamiento del acuífero freático. Se trata de una región de clima árido, en la cual la producción frutihortícola, una de las bases del desarrollo socioeconómico, depende del agua aportada por el riego proveniente de las aguas superficiales. El sector estudiado se caracteriza por la existencia de acuífero freático desarrollado en gravas de alta permeabilidad. Está limitado en profundidad por sedimentos de baja permeabilidad, y lateralmente por el mismo tipo de sedimentos y por el río Limay. El modelo de flujo utilizado preliminarmente (Visual Modflow) indica una coincidencia con la tendencia de flujo definida a partir de mediciones en el modelo conceptual. En el régimen de la capa freática se reconoce la influencia de los aportes del agua de riego, con diferencias entre los distintos sectores que presentan diferentes grados de uso de esta práctica.

Palabras clave: Hidrogeología. Flujo subterráneo. Llanura aluvial. Río Limay. Neuquén

Abstract: In this work, the alluvial plain of the Limay River (Argentina) is hydrogeologically characterized and a conceptual model for the phreatic aquifer behavior is proposed. The climate of the area under study is arid, therefore, irrigation through surface waters becomes the support for the area's agricultural production which is one of its development sources. The phreatic aquifer develops in high permeability alluvial gravels with low permeability bedrock as bottom limit and laterally bounded by low permeability rocks and the Limay River. The preliminary flow model (Visual Modflow) is consistent with the flow trends defined in the conceptual model using measured well data. In the phreatic regime it can be recognized the influence of the irrigation inflows having different magnitude according the area and intensity of such practice.

Key words: Groundwater flow. Alluvial plain. Limay River. Neuquen.

10.1. Introducción

Las zonas llanas próximas a los cursos de agua en regiones de climas áridos han sido la base para su desarrollo socioeconómico. Tal es el caso del sector inferior del Río Limay donde el sistema productivo presenta una fuerte dependencia de los recursos hídricos, en especial el superficial y en menor medida el subterráneo. Se destaca el abastecimiento a través de canales de riego para cultivos de frutas, además del uso del agua para actividades urbanas, agrícolas e industriales.

El conocimiento de las condiciones hidrogeológicas adquiere interés en la provisión de agua para distintos usos y también, dada la interrelación con los sistemas de riego y drenaje superficiales, resulta importante para la preservación de las condiciones ambientales, que están influenciadas por la alta vulnerabilidad del medio a las actividades del hombre. Estas actividades pueden generar cambios significativos en el régimen hidrológico de la región. La evaluación de dichos cambios y la posible predicción de escenarios que modifiquen la situación actual requieren conocer en forma adecuada el comportamiento hidrogeológico, constituyendo la modelación una herramienta fundamental para cumplir con tal finalidad.

El objetivo de este trabajo es efectuar una caracterización hidrogeológica y formular un modelo conceptual del funcionamiento del acuífero freático en la llanura aluvial del río Limay, estableciendo las bases para la formulación del modelo matemático del área.

10.2. Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Neuquén y ocupa una superficie de aproximadamente 55 km², en la planicie aluvial del sector inferior del río Limay. Hacia el este limita con el valle del río citado y hacia el oeste con las bardas que conforman un relieve más elevado de mesetas (fig. 10.1).

Desde principios del siglo xx existe en la zona una red extensa de canales de riego, con agua derivada del río Limay, que excepto en los meses de invierno se encuentran en permanente funcionamiento. Su finalidad es la provisión de agua necesaria para la importante explotación frutihortícola que se desarrolla en el área.

El río Limay nace en el lago Nahuel Huapi, aproximadamente a 380 km al sudoeste del área de estudio. El caudal proviene de la región periandina, y el río presenta un carácter permanente con un régimen de crecidas y estiajes condicionados por las particularidades de su alimentación pluvionival.

Los caudales anuales promedios son del orden de 720 m³/s y actualmente están regulados por el manejo de una serie de embalses ubicados en su tramo medio. El régimen hidrológico natural se caracteriza por presentar una doble onda de crecida. La primera durante el invierno, época en la que se producen las principales lluvias sobre



Figura 10.1: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

la cuenca. Las precipitaciones nievadas se acumulan hasta fines de primavera, en que se origina el deshielo provocando la segunda onda de crecida.

10.3. Materiales y métodos

En base a distintos antecedentes bibliográficos, cartas topográficas, imágenes Landsat™, Ikonos, fotografías aéreas y relevamientos de campo se han definido los rasgos geológicos, geomorfológicos y de uso del suelo que adquieren importancia en el movimiento del agua subterránea.

La información climática utilizada corresponde a la estación Neuquén Aéreo del Servicio Meteorológico Nacional (Argentina).

Las características hidrogeológicas tuvieron como base los datos de perforaciones realizadas en el área con fines de explotación y monitoreo, la mayoría de ellas de escasa profundidad (10 m) ya que captan el agua del acuífero freático.

El programa utilizado para el desarrollo del modelo es Modflow (Groundwater Vista, Versión 4). Para ello se definió una malla de geometría regular con celdas de 200 m por 300 m en un total de 43 filas y 50 columnas. Se definieron 3 capas desarrollándose el acuífero estudiado en esta etapa en la capa superior (layer 1), que corresponde a los depósitos aluviales cuaternarios y a los que se les asignó un coeficiente de permeabilidad de 100 m/día. Las capas inferiores (layer 2 y 3) se corresponden con términos superiores del grupo Neuquén de edad cretácica y constituyen la base hidrogeológica, de baja permeabilidad (10 m/día). El total de celdas del modelo es 6450 de las cuales 4570 son activas y el resto caracterizadas como de no-flujo (fig. 10.2).

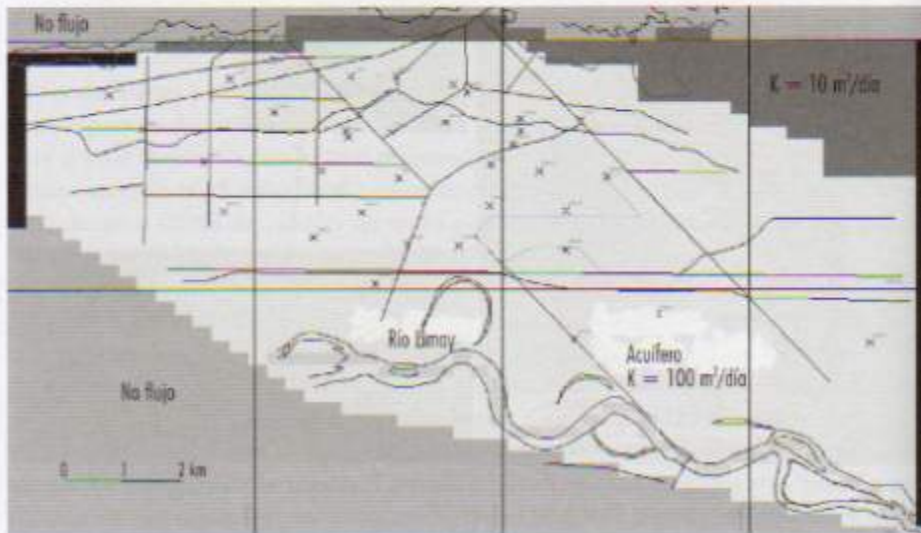


Figura 10.2: Condiciones de borde.

10.4. Contexto geológico e hidrogeológico

10.4.1. Rasgos geológico-geomorfológicos

Desde el punto de vista geológico la región se enmarca en el sector oriental de la Cuenca Neuquina, los depósitos que rellenan esta cuenca sedimentaria están subdivididos en tres ciclos sedimentarios: *ciclo jurásico*, *ciclo ándico* de edad Jurásico superior-Cretácico inferior, y *ciclo riognándico*. En éste se desarrollan los depósitos continentales del Grupo Neuquén, (Cazau y Uliana, 1972) de edad Cretácico superior; caracterizados por una sucesión monótona de areniscas y fangolitas rojas y grises de origen fluvial que alcanzan unos 600 m de espesor y en donde se definieron tres unidades hidrogeológicas (Laurencena y Kruse, 2008). Se encuentran dispuestos en posición horizontal y subhorizontal con escasa perturbación tectónica. Estas unidades son la base de sedimentos cuaternarios compuestos por depósitos aluviales, que han sido generados por el río Limay, constituidos por gravas y arenas sueltas de variada granulometría y sin cementar y con espesores que varían entre 10 y 12 metros. Sobre este tipo de sedimentos se sitúan los pozos de la red de monitoreo que se analizan.

Los suelos generalmente presentan texturas medias a gruesas (franca, franca arenosa, areno franca). En general son profundos, bien drenados y masivos o débilmente estructurados. Poseen muy bajos contenidos de materia orgánica.

El rasgo geomorfológico dominante en la zona es el de la *planicie de inundación* del río Limay, que limita hacia el oeste con un relieve de mesetas, de mayor elevación, que se denominan *bardas*. Esta planicie presenta un relieve plano a suavemente on-

dulado con una pendiente regional hacia el sur muy suave con gradientes de 0 a 2%. En general está compuesta en sus términos superiores aflorantes por limos y arenas con fracción pséfitica subordinada.

Las bardas corresponden a los bordes de las mesetas que se extienden en forma amplia al norte y al oeste del área, y que se encuentran afectadas por la erosión retrocedente generada por los abundantes cañadones poco desarrollados que drenan aguas pluviales torrenciales desde las bardas y considerados con un alto potencial erosivo ya que encauzan torrentes de barro. En estas bardas de relieve en gradería o escalera, las pendientes alcanzan valores de entre el 16 y 30%.

Las mesetas están representando a una planicie estructural, que constituye un relieve con escasa pendiente en dirección al este, acompañando a los estratos que se encuentran en posición subhorizontal.

10.4.2. Condiciones hidrometeorológicas

El clima es árido y según la clasificación de Thornthwaite presenta un carácter mesotermal con nulo exceso de agua.

La temperatura media anual es de 14,5 °C, con un rango que oscila desde el mes más frío, que es julio con un valor medio de 6,1 °C hasta el más caluroso representado por enero con 23,3 °C.

La precipitación media en el período 1900-2008 es de 207 mm/año, registrándose fuertes variaciones anuales desde un máximo de 358 mm/año hasta un mínimo de 65 mm/año.

En la distribución mensual de lluvias medias se observa una relativa homogeneidad, siendo el verano algo más seco (fig. 10.3).

El balance hídrico en términos anuales resulta deficitario en cuanto a sus posibilidades de excesos que posibiliten la recarga natural del agua subterránea. De cualquier forma, las escasas precipitaciones son de tipo torrencial (se ha producido un máximo diario de 37,2 mm) y ello puede producir excesos en cortos períodos de tiempo, favoreciendo un escurrimiento superficial rápido, en especial en el pie de barda y su infiltración en la planicie aluvial.

10.4.3. Hidrogeología

En el cuadro hidrogeológico de la región, el sistema acuífero, después de la capa de suelo (menos de 1 m de espesor), queda definido por el manto aluvial de gravas en donde se desarrolla el acuífero freático.

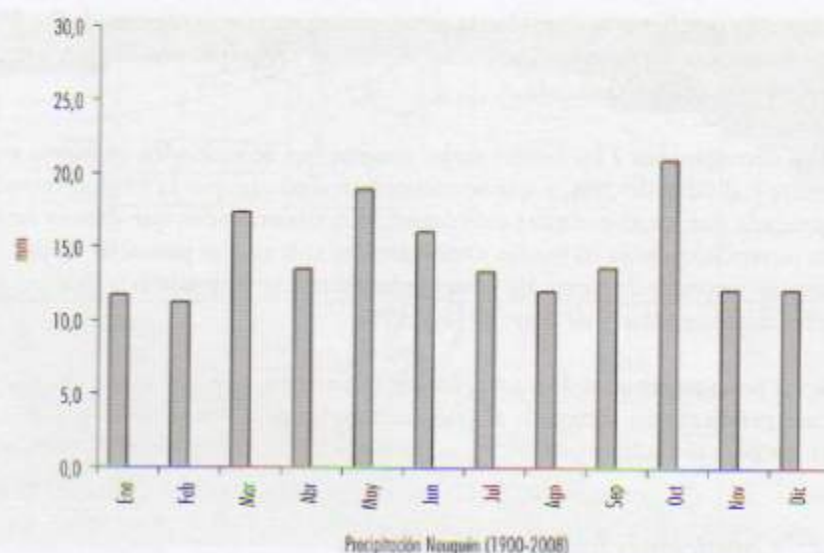


Figura 10.3: Precipitación promedio, Período 1900-2008. Ciudad de Neuquén.

Este manto de gravas conformado por clastos de grandes tamaños presenta un espesor medio que varía entre 10 y 12 m. Los límites de este nivel acuífero tanto en su base como en el borde norte lo constituyen arcilitas rojizas y areniscas correspondientes a lo que fue descrito como Grupo Neuquén y son de características acuícludos-acuitardos con algunos niveles de acuíferos pobres.

La superficie del terreno en la planicie aluvial se caracteriza por una alta capacidad de infiltración, que puede superar los 10 cm/h, lo cual permite calificar a este proceso como moderadamente rápido (Socic, 1978).

El manto aluvial de gravas, desde un punto de vista hidrogeológico representa a una unidad que posee una gran capacidad de almacenamiento y transmisión de agua de acuerdo a las características litológicas e hidráulicas. Los límites de este nivel acuífero, tanto en profundidad como en el borde norte del área, están formados por sedimentos de baja permeabilidad.

De acuerdo a los datos disponibles y a los ensayos efectuados, esta unidad acuífera se caracteriza por una alta conductividad hidráulica. La transmisividad media de esta unidad es el orden de 1000 m²/día, lo cual representa una conductividad hidráulica de aproximadamente 100 m/día. La porosidad efectiva estimada es del orden del 15%.

En cuanto a los depósitos de pie de barda, en base a las características sedimentológicas, corresponden a un predominio del carácter acuitardo.

10.5. Resultados

10.5.1. Caracterización hidrodinámica

Se han analizado las variaciones de los niveles freáticos medidos en el período 2003-2004, estableciéndose el año hidrológico entre las mayores alturas equipotenciales acontecidas en octubre y las menores, medidas en agosto.

El sentido general de escurrimiento es noroeste-sudeste, con una tendencia a descargar en el valle actual del río Limay. Los gradientes hídricos son homogéneos alcanzando valores medios del orden de $9,6 \times 10^{-4}$, con valores máximos de $2,5 \times 10^{-3}$ y mínimos de $5,5 \times 10^{-4}$. La morfología de la superficie potenciométrica es de tipo radial con tendencia a formas planares con filetes subparalelos.

A modo de ejemplo se muestran las variaciones freáticas medidas en pozos de tres sectores característicos del área de estudio. La figura 10.4 corresponde a un freatiómetro cercano a la barda, la figura 10.5 a uno del sector central del área y la figura 10.6 a uno cercano al río.

En el sector central (fig. 10.5) se pone de manifiesto que la recarga es producida por la derivación de los caudales del río Limay a través de todos los canales de riego. Se observa un aumento de los niveles freáticos a partir del comienzo del riego en la región. Si se consideran las variaciones freáticas y la porosidad del medio (15%) la lámina de la recarga derivada del riego significa 45 mm/mes.

El pozo correspondiente a las proximidades del río (fig. 10.6), si bien responde al aporte del riego se encuentra afectado por las variaciones del nivel de agua del río. El freatiómetro situado al pie de la barda (fig. 10.4) no registra variaciones con respecto al tiempo en que se produce el riego.

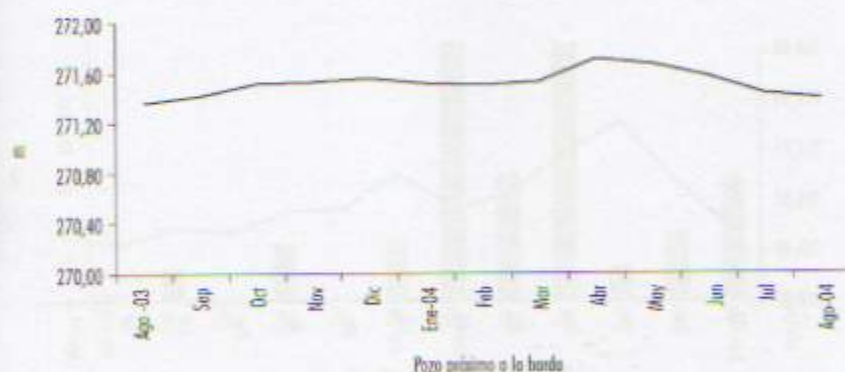


Figura 10.4: Variaciones freáticas en las proximidades del pie de barda.

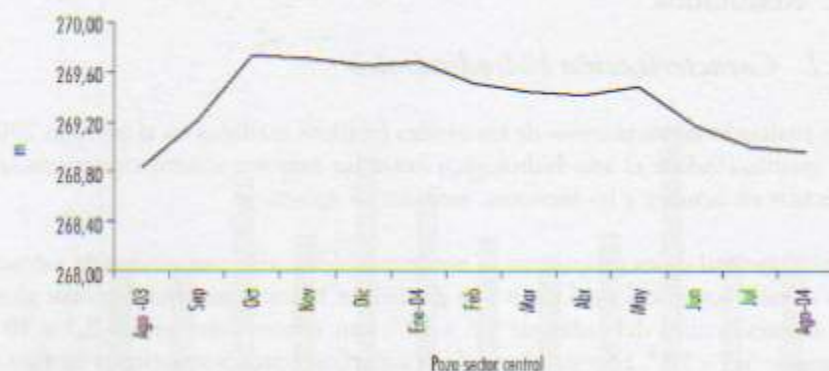


Figura 10.5: Variaciones freáticas en el centro de la planicie.

Las características descritas se pueden observar en el mapa del flujo comparativo entre Agosto de 2004 y Octubre de 2003, que representan los meses de máximo y mínimo profundidad del nivel freático (fig. 10.7).

Una verificación de la escasa influencia de las precipitaciones en las fluctuaciones freáticas se tiene si se las compara con las variaciones en las precipitaciones en el mismo período. En la figura 10.8 se han representado las precipitaciones de Neuquén para los años 2003 y 2004.

Las altas lluvias registradas en los primeros meses de 2004: febrero (66,2 mm), marzo (31,9 mm) y abril (65,5 mm) fueron superiores a los valores medios. En general, y en particular en pozos situados en la zona de pie de barda se manifiesta un leve ascenso en los niveles freáticos que podría asociarse con la situación descrita. Mientras que en los pozos situados en el sector central y en las proximidades del río no existe esta manifestación. En agosto y septiembre de 2003 las precipitaciones fueron mínimas y es cuando se produce el mayor ascenso de los niveles freáticos.

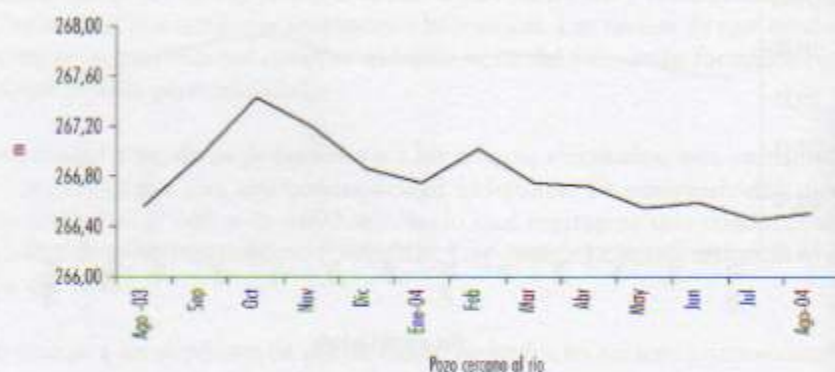


Figura 10.6: Variaciones freáticas en las proximidades del río.

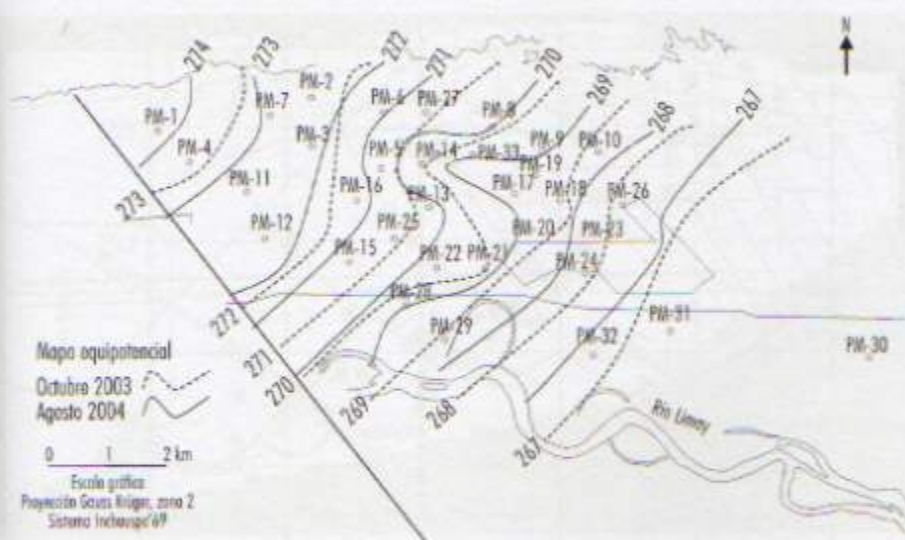


Figura 10.7: Mapa equipotencial de datos obtenidos mediante mediciones en octubre de 2003 y agosto de 2004.

10.5.2. Modelo conceptual y bases de formulación del modelado matemático

Los límites físicos del acuífero freático, están formados, verticalmente por la superficie del terreno y por una base arcillosa situada a una profundidad que oscila entre 10 y 12 m, constituida por sedimentos de baja permeabilidad.

Los límites laterales son, al norte el flanco de la meseta y al sur el límite hidrológico que constituye el río Limay. Al oeste y al este se produce la afluencia y efluencia de

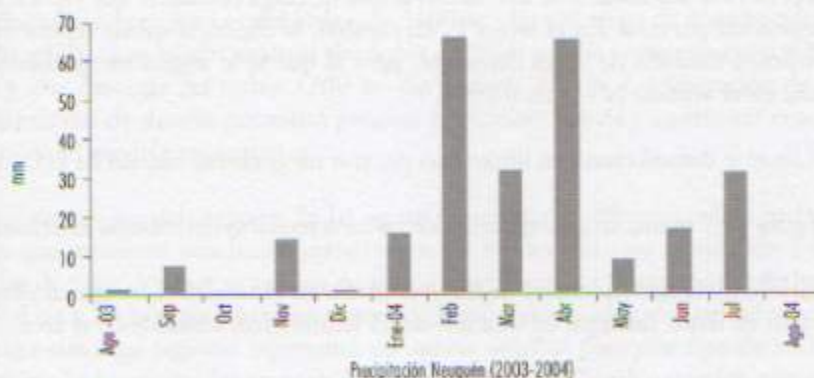


Figura 10.8: Precipitación de la ciudad de Neuquén. Período 2003-2004.



Figura 10.9: Modelo estacionario. Cargas hidráulicas calculadas.

agua tanto superficial como subterránea. Los ingresos al acuífero incluyen a la afluencia subterránea (del orden de 3400 m³/día) y el riego (1100 m³/día), mientras que los egresos se producen a través del río (del orden de 1700 m³/día) y de la efluencia subterránea (2800 m³/día).

Los parámetros hidráulicos asignados al acuífero para la modelación se obtuvieron a partir de ensayos de bombeo. En el modelo se le asigna al acuífero un valor de $K_h = K_x = K_y = 100$ m/d. Asimismo se define una zona de relativa baja permeabilidad ($K_h = K_x = K_y = 10$ m/d) en coincidencia con el límite norte y noreste, obtenido por la zona de pie de barda.

En el borde NW del modelo se definieron celdas de carga constante que representan la afluencia subterránea. En el sector E, en cambio, la efluencia queda representada por un límite también de carga constante, pero al que se le asignó un gradiente de variación en el sentido N – S de 0,0002.

El río Limay se definió como un límite tipo río, con un gradiente hídrico de $2,5 \times 10^{-4}$.

En la figura 10.9 se muestra un esquema de las características del modelo estacionario.

El modelo respeta las tendencias de flujo definidas en el modelo conceptual obtenido a partir de datos medidos en una red de 33 frentímetros situados en el área.

El gráfico que relaciona los valores medidos con los calculados se muestra en la figura 10.10, obteniéndose valores de coeficiente de correlación $R = 0,939$.

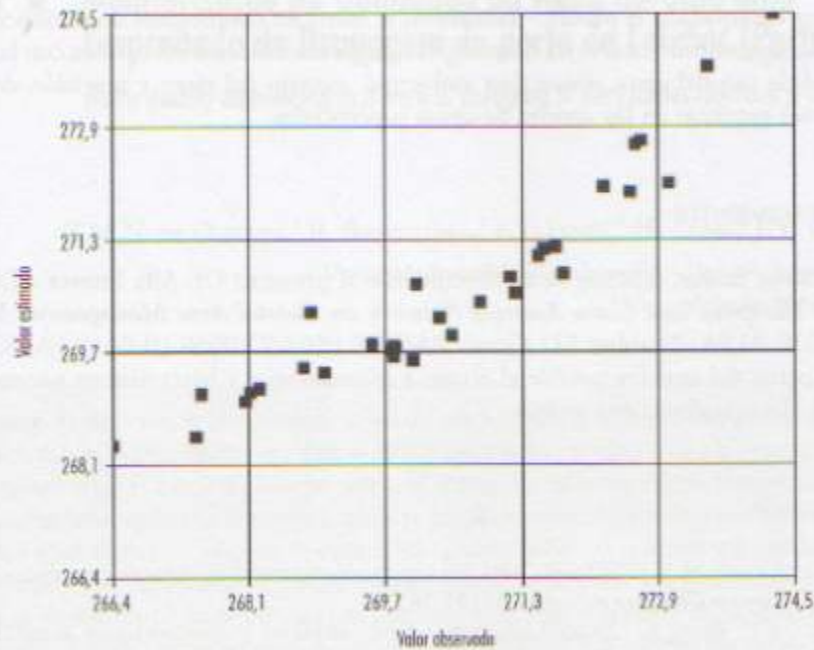


Figura 10.10: Cargas hidráulicas medidas *versus* cargas hidráulicas calculadas.

10.6. Conclusiones

El modelo numérico elaborado en estado estacionario, muestra un buen ajuste entre el flujo subterráneo simulado y los datos medidos en el campo. Se plantearon las condiciones iniciales para planificar una simulación posterior en estado transitorio considerando la influencia del sistema de riego. Si bien el balance de masas (entradas y salidas del acuífero) presenta la dificultad del limitado conocimiento de la distribución y el volumen ingresado por riego, se estimó que el ingreso al sistema a partir de la afluencia subterránea es del orden de 3400 m³/día y el riego de aproximadamente 1100 m³/día. Las salidas abarcan alrededor de 2800 m³/día como efluencia subterránea y una descarga del orden 1700 m³/día a través del río. La generación de nueva información de detalle permitirá precisar los límites físicos y continuar con el desarrollo del modelo matemático.

El conocimiento del régimen de las aguas subterráneas, diferenciando aquellos sectores que muestran una fuerte variación de los niveles freáticos en relación a los períodos de riego, los que se asocian en forma directa con las fluctuaciones de los niveles del río y los que presentan una escasa variación vinculados sólo con el proceso de recarga–descarga regional representa un aporte original para este tipo de ambientes de clima árido, ya que los ascensos y descensos del nivel freático pueden comprometer el desarrollo de los cultivos, e incluso provocar degradación de los suelos.

Una vez desarrollado el modelo transitorio, se estará en condiciones de reconocer el impacto de distintos escenarios hidrológicos, especialmente, los vinculados con la necesidad de uso del agua, protección ambiental, manejo del riego y previsión de situaciones extremas en los aportes de aguas superficiales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al proyecto UE Alfa Project *ELAN-CAM: European and Latin America Network on Coastal Area Management*. Proyecto UE ALFA, Number EU Grant: AML/19.0902/97/0666 (II-0419-FA-FCD-FI), a partir del cual fue posible el acceso a metodologías y herramientas necesarias para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

- CAZAU L., ULIANA M.A. (1972). El Cretácico superior continental de la cuenca neuquina. *Actas V Congreso Geológico Argentino* 3: 131-163.
- LAURENCENA P., KRUSE E. (2008). Caracterización de acuíferos profundos en un sector de la Cuenca Neuquina. *IX Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea y Expo Agua* Publicado en CD. Quito. Ecuador.
- RAMOS V. (1978). Estructura, Geología y Recursos Naturales del Neuquén. En: *Relatorio VII Congreso Geológico Argentino. Neuquén*. pp. 99-118.
- RUMBAUGH J., RUMBAUGH D. (2005). *Groundwater Vistas Versión 4*. Environmental Simulations, Inc.
- SOCIC M. (1978). Recursos Hídricos Subterráneos. En: Geología y Recursos Naturales del Neuquén. *Relatorio VII Congreso Geológico Argentino. Neuquén*. pp. 309-324.