



## **INFLUENCIA DE UN POZO DE BOMBEO SOBRE UN CAUCE SUPERFICIAL**

**JULIO CORNEJO Y CARLOS ESPINOZA**

División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad de Chile, Casilla 228-3, Santiago, Chile  
Fono: (56 2) 678 4390, Fax: (56 2) 6894171

[jcornejo@ing.uchile.cl](mailto:jcornejo@ing.uchile.cl) , [espinoza@ing.uchile.cl](mailto:espinoza@ing.uchile.cl)

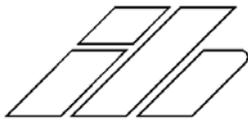
<http://cipres.cec.uchile.cl/~espinoza/>

### **RESUMEN**

El problema de interferencia entre un río y un acuífero producto de la extracción desde un pozo cercano es resuelto hoy en día utilizando el método de Jenkins, el que presenta una serie de limitaciones técnicas que lo alejan de un caso real. Sin embargo, los bajos costos para la obtención de sus parámetros, su fácil manejo gráfico y el desconocimiento de otras metodologías lo convierten en la herramienta más utilizada en casi todo el mundo. En este trabajo se analiza una herramienta analítica mucho más confiable, que representa de mejor forma un sistema en que interactúan un río y un acuífero, incorporando el grado de penetración parcial del lecho del río en el acuífero y una capa de menor permeabilidad, que obstruye el flujo vertical desde el río hacia el acuífero. Este análisis tiene la finalidad de comparar ambos métodos y estudiar el efecto de estas suposiciones más realistas. Otra forma de analizar la interferencia río – acuífero es utilizando herramientas numéricas, simulando las condiciones de un río parcialmente penetrante y con un lecho de baja permeabilidad, cuyos resultados son comparados cuantitativamente con las soluciones analíticas.

### **ABSTRACT**

The problem of interference between surface water and groundwater resources is usually approached using the so called Jenkins' solution, which introduces a number of simplifying assumptions that limit the validity of the theoretical solution. Besides this real limitation, the Jenkins' solution is extensively used all around the world for water resources management. A more realistic solution to analyze the interference between a river and a pumping well is presented in this paper. This solution includes both the effect of a partial penetration of the river into the aquifer and the effect of a low permeability layer which limit the amount of vertical flow from the river to the aquifer. A comparison between these two solutions is presented and discussed.



## **INFLUENCIA DE UN POZO DE BOMBEO SOBRE UN CAUCE SUPERFICIAL**

### **1 Introducción**

Determinar el origen del agua y estimar el caudal que es posible extraer desde un pozo de bombeo, que se encuentra próximo a un cauce superficial, se ha transformado hoy en día en una actividad crítica dentro de la gestión y administración de los derechos de aprovechamiento de recursos hídricos superficiales y subterráneos.

En la actualidad, la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), utiliza un método gráfico, conocido como el método de Jenkins, para cuantificar el nivel de interferencia entre un pozo de bombeo y una fuente superficial situada en sus inmediaciones (DGA, 1999). El método de Jenkins entrega una solución analítica que permite determinar el efecto que una captación de aguas subterráneas tiene sobre el agua que circula en un río o canal, el que presenta una conexión hidráulica directa entre el cauce superficial y el sistema acuífero. En forma específica, la solución de Jenkins permite determinar que porcentaje del caudal de bombeo proviene de recursos superficiales del río o canal.

El método de Jenkins es usado extensivamente, tanto en Chile como en el extranjero, sin un conocimiento pleno de sus limitaciones teóricas e hipótesis simplificadoras, lo que se traduce, en general, en una sobreestimación del impacto de un pozo de bombeo sobre un cauce superficial. La razón principal de su éxito como metodología de análisis para problemas de interferencia río-acuífero se relaciona con su fácil manejo gráfico, así como con la inexistencia de métodos alternativos que sean confiables y simples.

En los últimos años se ha desarrollado una gran variedad de métodos que permiten estudiar el fenómeno de interferencia mediante soluciones analíticas que representan en forma más adecuada el problema real, incorporando modelos conceptuales más cercanos a la realidad.

En este trabajo se describen algunos métodos más actualizados, que si bien tienen una serie de hipótesis simplificadoras e incorporan una mayor cantidad de parámetros, tanto del río como del acuífero, permiten realizar análisis más confiables del fenómeno de interferencia río-acuífero.

### **2 Soluciones Analíticas**

#### **2.1 Aspectos Generales**

Desde un punto de vista teórico, la interferencia entre un pozo de bombeo y un río es estimada en forma cuantitativa utilizando el método de Jenkins, el que entrega una solución analítica que permite determinar que porcentaje del caudal y/o volumen extraído por un pozo de bombeo es proporcionado o recargado desde el río hacia la napa.

El método de Jenkins corresponde a un modelo analítico en régimen impermanente, el que fue desarrollado inicialmente por Theis el año 1941 para evaluar el impacto provocado por el bombeo cerca de un río. Esta aproximación fue generalizada más tarde por Glover y Balmer en el año 1954, basándose en una serie de



suposiciones ideales que incluyen un río totalmente penetrante en el acuífero, así como una conexión hidráulica directa entre el río y el acuífero adyacente. En el año 1968 Jenkins utilizó las soluciones anteriores y desarrolló una solución analítica simplificada, la que ha llegado a ser la herramienta más importante, a nivel mundial, para la evaluación del efecto de un pozo de bombeo sobre un río situado en las cercanías.

En el año 1965, Hantush mejoró el modelo original, al considerar que la conexión hidráulica entre el río y el acuífero no es perfecta. Sin embargo, en esta solución se mantuvo el supuesto que el cauce penetra completamente el acuífero. A pesar de que esta solución se acerca más a una situación real, no ha sido usada para analizar problemas prácticos debido a la dificultad que existe para estimar el espesor de la capa vertical semipermeable que simula el efecto de la pérdida de carga entre el río y el acuífero.

Tal como se mencionó anteriormente, ambos modelos conceptuales (Jenkins y Hantush) suponen que el cauce penetra completamente el acuífero, lo que se aleja bastante de la realidad. Información disponible muestra que los ríos penetran sólo parcialmente el acuífero, y en muchos casos el porcentaje de penetración es menos de un 10% de su espesor. Grigoyev (1957) y Bochever (1966) estudiaron el efecto de considerar la penetración parcial del río en el acuífero, separándolos por una zona de menor conductividad hidráulica. Grigoryev y Bochever resolvieron el problema analíticamente encontrando una solución en régimen permanente para cuantificar el fenómeno de interferencia.

En los últimos años se ha avanzado en cuanto a resolver este problema, incorporando nuevas suposiciones e hipótesis que asemejen los modelos conceptuales a lo que ocurre en un sistema natural. En este sentido, Zlotnik (1999) desarrolló una solución analítica impermanente para estimar el vaciamiento del río sobre la base de los modelos conceptuales de Grigoryev y Bochever. Paralelamente a este trabajo, Hunt (1999) propuso una solución para descensos y vaciamientos muy parecida a la de Hantush, sin embargo, los parámetros que utiliza representan en mejor forma una situación real donde interactúan el río y el acuífero.

## 2.2 Solución de Jenkins

Una solución semianalítica para evaluar los efectos de un pozo de bombeo sobre los caudales de un río fue desarrollada por Theis (1941). El modelo conceptual utilizado por Theis se presenta en la Figura 1. En 1954 el análisis fue completado en forma teórica por Glover y Balmer, lo que permitió encontrar una forma simple para el caudal de vaciamiento del río usando la función de error de complementario.

$$\frac{q}{Q} = \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{S \cdot l^2}{4 \cdot T \cdot t}} \right) \quad (1)$$

donde

- q : Caudal de vaciamiento del río [ $L^3 / T$ ].
- Q : Caudal de extracción desde el pozo [ $L^3 / T$ ].
- S : Coeficiente del almacenamiento del acuífero [adimensional].



- T : Transmisividad del acuífero [ $L^2 / T$ ].  
t : Duración del período bombeo [T].  
l : Distancia más corta entre el pozo y borde del río [L], basado en el río que se aproxima como una línea recta.

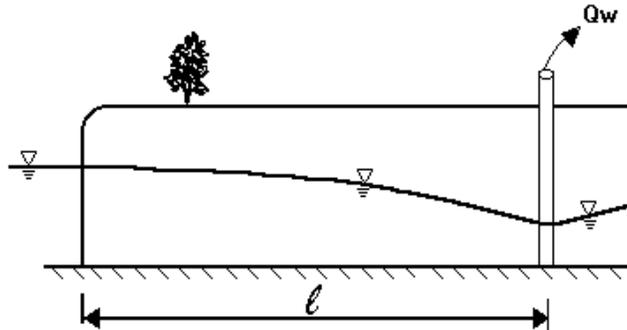


Figura 1 Modelo de Theis

Algunas hipótesis utilizadas para resolver analíticamente este problema se muestran a continuación:

- ❖ La transmisibilidad no varía en el tiempo. De esta forma, el descenso del nivel freático es considerado despreciable en comparación con el espesor saturado.
- ❖ El acuífero es isotrópico, homogéneo, y semiinfinito en el área de estudio.
- ❖ El río define una condición de borde y penetra completamente el acuífero.
- ❖ El agua es liberada instantáneamente desde el almacenamiento.
- ❖ El pozo está abierto a todo el espesor saturado del acuífero.
- ❖ El caudal de bombeo es constante durante el período de bombeo.

La ecuación de Glover y Balmer (1954) fue utilizada por Jenkins en 1968 para desarrollar una metodología de análisis para problemas de interferencia río-acuífero. En un artículo desarrollado por el mismo autor el año 1977, Jenkins observa que el usuario promedio no ocupa este método debido a que debe enfrentarse a cálculos matemáticos complejos que involucran el uso de una integral o la evaluación de la función de error complementario. Debido a esta situación, Jenkins desarrolló un método gráfico en el cual se incluyen curvas simples para estimar los efectos de vaciamiento del río, usando la ecuación de Glover y Balmer que hasta hoy en día ha sido la herramienta analítica normalmente usada por evaluar los efectos de vaciamiento de río. En el “Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de recursos Hídricos” (1999) de la Dirección General de Aguas DGA del MOP, se encuentran los pasos de cálculo de interferencia a partir de los gráficos realizados por Jenkins (Figura2).

El factor de vaciamiento de río se definió por Jenkins (1977) para describir la conexión hidráulica entre el río y el pozo de bombeo. Este término combina los parámetros del acuífero T (transmisividad) y S (coeficiente de almacenamiento) con la distancia entre el pozo y el río. Además, este término es una medida del tiempo en el cual el 28% del volumen extraído por el pozo de bombeo proviene del río o cauce superficial.



$$sdf = \frac{l^2 \cdot S}{T} \quad (2)$$

- Q** : Caudal constante de bombeo en el pozo.  
**q** : Caudal de vaciamiento en el río.  
**t** : Tiempo de bombeo.  
**V** : Volumen del agua bombeada que procede del río, durante el tiempo t.  
**l** : Distancia del pozo al río.  
**sdf** : factor de vaciamiento del río, termino definido por Jenkins, 1968.

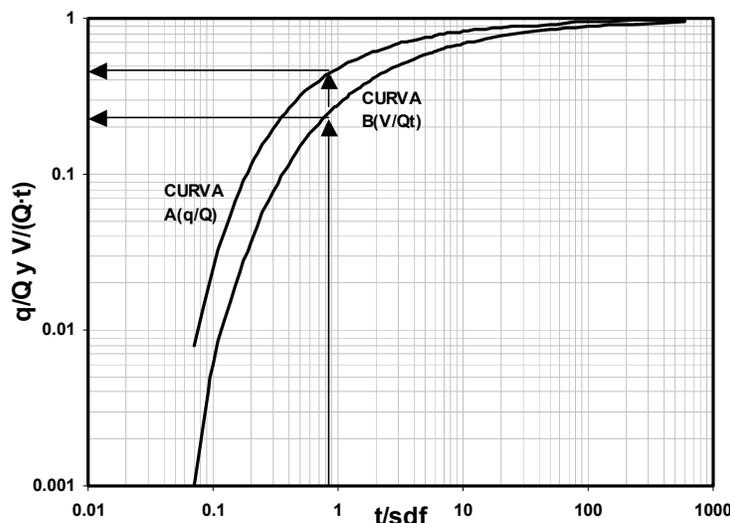


Figura 2 Método Gráfico de Jenkins para Cálculos de Interferencia.

La metodología de cálculo de vaciamiento del método gráfico consiste en evaluar el valor adimensional  $t/sdf$ , con el que se ingresa en el gráfico al eje de las abscisas. De la curva A en el eje de las ordenadas se obtiene el valor del porcentaje del caudal de vaciamiento del río para la extracción del pozo  $q/Q$  y de la curva B se obtiene el porcentaje de volumen de vaciamiento del río  $V/(Q \cdot t)$ . Luego si se conocen los valores de  $Q$  y  $t$ , se obtienen los valores de  $q$  y  $V$ .

### 2.3 Solución de Hunt

El Dr. Bruce Hunt de la Universidad de Canterbury, Nueva Zelandia, desarrolló recientemente una nueva ecuación analítica que permite incorporar los efectos de la penetración parcial de un cauce superficial y un lecho de río obstruido sobre el caudal de vaciamiento desde el río, según se muestra en la Figura 3 (Hunt, 1999). La solución analítica derivada por Hunt incorpora un término adicional a la solución de Glover y Balmer, la que da cuenta de la conexión hidráulica incompleta entre el río y el sistema acuífero. Esta solución se presenta a continuación:

$$\frac{q}{Q} = \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{S \cdot l^2}{4 \cdot T \cdot t}} \right) - \exp \left( \frac{\lambda^2 \cdot t}{4 \cdot S \cdot T} + \frac{\lambda \cdot l}{2 \cdot T} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{\lambda^2 \cdot t}{4 \cdot S \cdot T}} + \sqrt{\frac{S \cdot l^2}{4 \cdot T \cdot t}} \right) \quad (3)$$



$$\lambda = k' \cdot \frac{w}{m'} \quad (4)$$

donde

- q : Caudal de vaciamiento del río [ $L^3 / T$ ].
- Q : Caudal de extracción desde el pozo [ $L^3 / T$ ].
- S : Coeficiente del almacenamiento del acuífero [adimensional].
- T : Transmisividad del acuífero [ $L^2 / T$ ].
- t : Duración del período bombeo [T].
- l : Distancia más corta entre el pozo y borde del río [L], basado en el río que se aproxima como una línea recta.
- $\lambda$  : Parámetro de recarga del río al acuífero conocido como conductancia [L/T].
- k' : Conductividad hidráulica del lecho del río [L/T];
- w : Ancho del lecho del río [L].
- m' : Espesor del lecho del río [L].

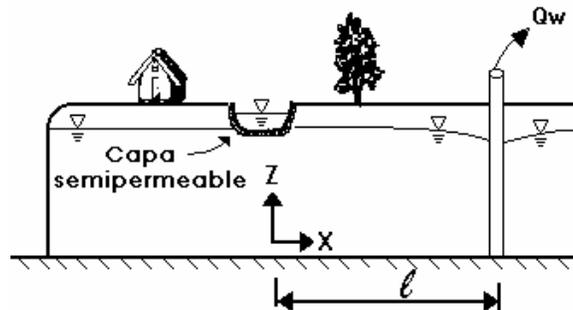


Figura 3 Modelo de Hunt.

La ecuación de Hunt (3) está basada en las siguientes suposiciones:

- ❖ No existen flujos verticales de importancia (Aproximación de Dupuit).
- ❖ El acuífero es de extensión infinita y es homogéneo e isotrópico en toda dirección.
- ❖ Los descensos son pequeños comparados con el espesor del acuífero saturado, lo que permite que la ecuación que gobierna el flujo sea linealizada.
- ❖ La sección transversal del lecho del río tiene dimensiones horizontal y vertical que son pequeñas comparadas con el espesor del acuífero saturado, y el río se extiende de  $y = -\infty$  hasta  $y = \infty$  a lo largo de  $x = 0$ .
- ❖ El caudal extraído desde el pozo de bombeo permanece constante para  $0 < t < \infty$ .
- ❖ Cambios en la elevación superficial en el río creadas por el bombeo son pequeños comparados con los cambios en la elevación del agua en el acuífero al otro lado de la capa semi permeable.
- ❖ Las tasas de filtración desde el río hacia el acuífero son linealmente proporcionales a los cambios en la altura piezométrica a través de la capa semi permeable.



### 3 Modelación Numérica

Visual MODFLOW, modelo numérico de diferencias finitas, desarrollado por el United States Geological Survey (USGS), se utilizó para simular numéricamente un sistema acuífero que reproduzca el modelo conceptual utilizado por Hunt (1999). Para simular el acuífero se definió un dominio de 21000 x 21000 m<sup>2</sup>, discretizado en una grilla regular de 100 x 100 m<sup>2</sup>.

Para simular el efecto del río, Visual MODFLOW tiene incorporado el paquete RIVER. Para su uso es necesario determinar el valor de una propiedad matemática denominada “Conductancia Numérica”, que es un parámetro a calibrar en una simulación de un sistema real, utilizando información de terreno. Para efectos de nuestro análisis se comparó esta “conductancia numérica” con la conductancia analítica descrita en (4). Suponiendo que el río es una línea recta en el eje y, entonces la conductancia numérica se define como  $C_{NUM} = \lambda \cdot \Delta y$ , en que  $\lambda$  corresponde a la conductancia analítica de Hunt (1999) y  $\Delta y$  es el largo del río en la celda en que se ubica el río.

### 4 Resultados

Para analizar las soluciones analíticas de Jenkins y Hunt, es necesario evaluarlas con algunos parámetros característicos del río y del acuífero que conforman el sistema en estudio. Para ello se idealiza un sistema río – acuífero con los siguientes parámetros (ver Figura 3). El río se encuentra a una distancia (l) del río de 400 m, el río tiene 5 m de ancho (w) y un espesor del lecho (m') de 1 m, para la conductividad del lecho del río (K') se considera tres valores diferentes, entre uno a tres ordenes de magnitud menor que la conductividad del acuifero (Larkin y Sharp, 1992). El acuífero tiene 60 m de espesor (b), la conductividad (K) del acuífero se considera de 20 m/día, y el coeficiente de almacenamiento (S) es igual a 0,01. De acuerdo a estos parámetros, se obtiene que los valores del parámetro  $\lambda$  calculados de la ecuación (4) son de 0,1; 1 y 10 m/día. La solución analítica de Hunt se presenta resumida en la Figura 4. Del análisis de la Figura 4 se aprecia que al cabo de 350 días de bombeo continuo, la solución de Jenkins indica que el aporte del río es de un 97%. Al considerar los valores posibles del parámetro  $\lambda$  se observa que el método de Hunt indica que el vaciamiento del río es menor al estimado por Jenkins, apreciándose un 94% de caudal de vaciamiento cuando  $\lambda = 10$  m/día, un 77% cuando  $\lambda = 1$  m/día y 23% cuando  $\lambda = 0,1$  m/día. Esto indica que en la medida que el río sea más conductivo mayor es el efecto del pozo de bombeo sobre el vaciamiento del río. La tendencia de los resultados indica que cuando el río es altamente conductivo ( $\lambda \rightarrow \infty$ ) la solución de Hunt se confunde con la solución de Jenkins.

Al utilizar este modelo conceptual para estudiar las soluciones analíticas de Jenkins y Hunt se puede determinar numéricamente el caudal de vaciamiento inducido por la operación de un pozo de bombeo cercano al cauce. De esta forma, en la Figura 5 se aprecia el efecto de la “Conductancia Numérica” utilizada en el programa Visual MODFLOW, donde cada uno de los valores de C tienen su equivalencia con el término  $\lambda$  definido por Hunt. Para efectos de este análisis se ha utilizado un valor de  $\Delta y$  igual a



100 m. En esta figura se ve que la modelación numérica reproduce en forma similar la solución teórica para el caudal de vaciamiento, según lo que se mostró en la Figura 2.

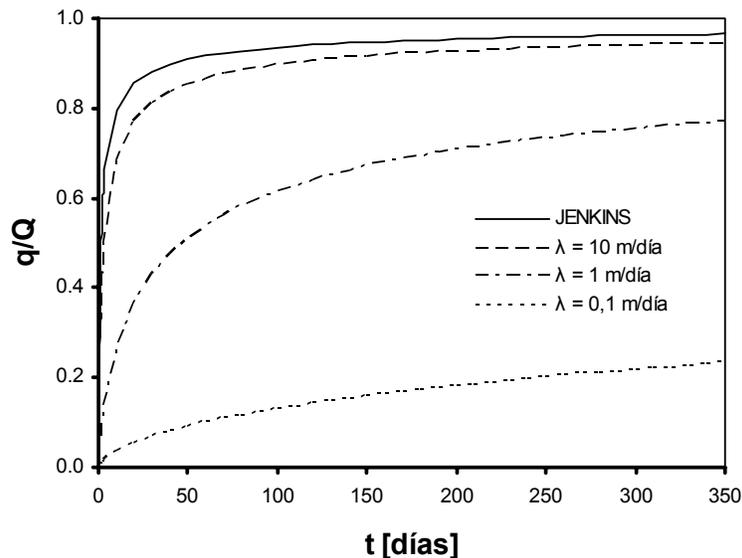


Figura 4 Evaluación de Vaciamientos del Río según Theis (1941) y Hunt (1999)

Para analizar el efecto de la extracción de aguas subterráneas desde un pozo de bombeo ubicado a 400 m de un río, se ubicó un pozo de observación en una posición intermedia entre el pozo de bombeo y el río. En este pozo de observación es posible apreciar el efecto del bombeo sobre los niveles del agua subterránea para distintas configuraciones del sistema (distintos valores de conductancia), los que se representan gráficamente en la Figura 6. En esta figura se puede apreciar que, para el caso de Jenkins, al cabo de un día de bombeo continuo el descenso en el pozo de observación se reduce considerablemente, llegando incluso a una estabilización casi completa de los niveles al cabo de 10 días de bombeo. Esta situación se produce debido a que el río se transforma en una fuente constante de recarga para el acuífero. Al analizar la situación para distintos valores de la “conductancia numérica” se puede observar que mientras más conductivo es el río, es decir mientras mayor es la conexión hidráulica entre el río y el acuífero, mayor es el efecto de la recarga del río sobre los niveles de agua en el pozo de observación. Asimismo, la Figura 6 permite deducir que mientras mayor es el parámetro C (mayores que 1000 m<sup>2</sup>/día), los niveles de agua en el pozo de observación tienden a estabilizarse en el tiempo. Para el caso de un valor de C muy pequeño (menores que 10 m<sup>2</sup>/día) la conexión hidráulica entre el río y el acuífero adyacente es menor, por lo que el pozo satisface toda su demanda desde el acuífero, descendiendo los niveles indefinidamente.

Un gráfico como el utilizado en la Figura 6 puede ser representado para distintos valores de la conductancia analítica de Hunt ( $\lambda$ ) y puede ser utilizado como una serie de curvas para determinar, a través del ajuste de una prueba de bombeo, el parámetro  $\lambda$  asociado a un sistema acuífero específico. Esta metodología es similar a la desarrollada por Walton (1967) para el análisis de pruebas de bombeo en sistemas acuíferos semiconfinados.

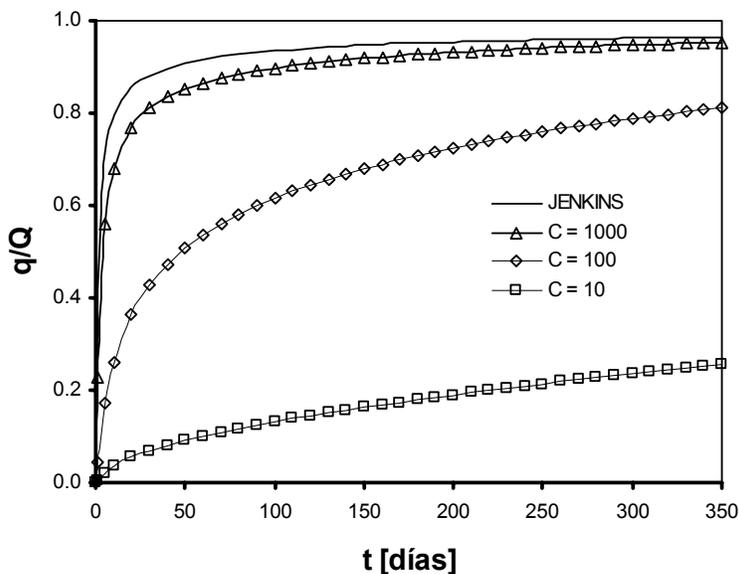


Figura 5 Evaluación de Vaciamientos del río, MODFLOW

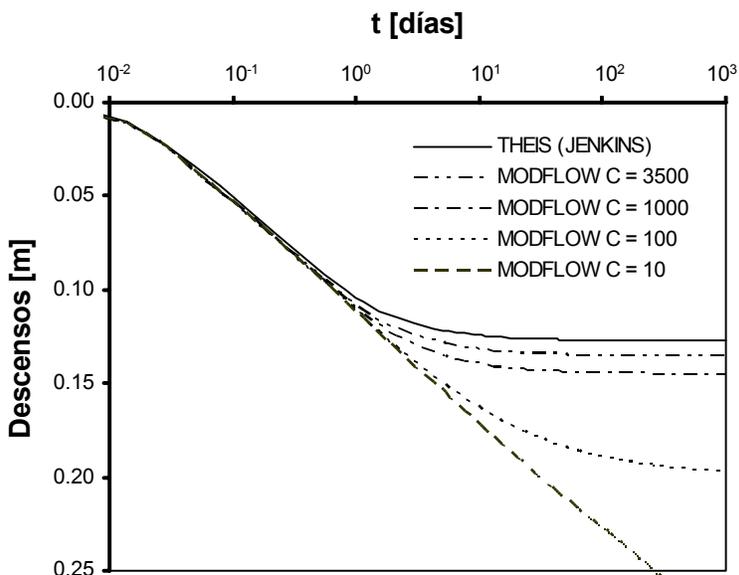


Figura 6 Evaluación de Descensos en el acuífero, MODFLOW

## 5 Conclusiones y/o Comentarios

Del análisis realizado en este trabajo se aprecia que las dos soluciones analíticas entregan resultados muy diferentes al ser evaluadas, tanto para efectos del caudal de vaciamiento como del descenso en un pozo de observación. El hecho de utilizar la solución de Jenkins para la adjudicación de derechos de aguas subterráneas resulta poco eficiente si se desea optimizar el uso conjunto de los recursos hídricos dentro de alguna sección o cuenca hidrográfica donde exista fuerte demanda de estos recursos, ya que las hipótesis de esta solución hacen sobreestimar el efecto del vaciamiento del río y no incorpora parámetros asociados al río, que presenta una capa de menor permeabilidad en su lecho, lo que puede obstruir el flujo vertical hacia el acuífero.



La solución de Hunt (1999) representa en forma muy adecuada un sistema real, incorporando parámetros más realistas tanto del río como del acuífero. Los parámetros de interés para este análisis pueden ser estimados directamente desde una prueba de bombeo a caudal constante, en la que se cuente con un pozo de observación cercano.

En estos momentos se está estudiando casos reales en los cuales se ha determinado que existe interferencia entre un pozo de bombeo y una fuente superficial, con el propósito de analizar pruebas de bombeo reales y estimar el parámetro de la conductancia analítica ( $\lambda$ ). Posteriormente, se utilizará la metodología de Hunt para evaluar los caudales de vaciamiento del río y realizar comparaciones con el enfoque tradicional descrito por la solución de Jenkins.

## 6 Referencias

Butler Jr, J., Vitaly A. Zlotnik, and Ming-Shu Tsoul. 2001. Drawdown and Stream Depletion Produced by Pumping in the Vicinity of a Partially Penetrating Stream. *Ground Water* 39, no. 5, 651-659.

Custodio, E. y Llamas, M. 1996. *Hidrología Subterránea*. Tomo I. Ed. Omega. Barcelona, España, capítulo 11, pág. 1147.

Bochever, F. M. 1966. Evaluation of well-field yield in alluvial aquifer: The impact of partially penetrating stream. In *Proceedings of VODGEO (Hydrogeology)* 13: 84-115 (in Russian). (Citado en Butler, 2001)

DGA. 1999. "Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de recursos Hídricos". Interferencia río – acuífero, Anexo XI.

Glover, R. E., and C. G. Balmer. 1954. River depletion for pumping a well near a river. *American Geophysical Union Transactions* 35, no. 3: 468-670.

Grigoryev, V. M. 1957. The effect of streambed siltation on well-field yield in alluvial aquifer. *Water Supply and Sanitation* 6, 110-118 (in Russian). (Citado en Butler, 2001)

Hantush, M. S. 1965. Wells near streams with semipervious beds. *JnL Geophysical Research* 70, no. 12: 2829-2838.

Hunt, B. 1999. Unsteady stream depletion from ground water pumping, *Ground Water* 37, no. 1: 98-102.

Jenkins, C. T. 1968. Techniques for computing rate and volume of stream depletion by wells. *Ground Water* 6, no. 2: 37-46.

Larkin, R. G. and J. M. Sharp Jr. 1992. On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow direction in alluvial aquifers. *Geological soc. Of America Bull.* 104, 1608-1620. (Citado en Butler, 2001)

Walton, W. C. 1960. Leaky artesian aquifer conditions in Illinois. *Illinois State Water Survey Report of Investigation* 39.

Winter, T. Harvey, H. Lehn, O. Alley, W. 1998. *Ground Water and Surface Water A Single Resource*. U. S. Geological Survey Circular 1139.

Zlotnik, V. A., H. Huang, and J.J. Butler Jr. 1999. evaluation of stream depletion considering finite stream width, shallow penetration, and properties of stream sediments. In *proceedings of Water 99, Joint congress*, 221-226. Brisbane, Australia: (también disponible en [www.kgs.ukans.edu/StreamAg](http://www.kgs.ukans.edu/StreamAg)).