

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**MODELACIÓN ACOPLADA DE AGUAS SUPERFICIALES Y
SUBTERRÁNEAS PARA LA GESTIÓN CONJUNTA DEL RECURSO
HÍDRICO**

*Oscar Andrés Estrada Restrepo¹, Jaime Ignacio Vélez Upegui², María Victoria Vélez Otálvaro³ y
Carlos Restrepo-Tamayo⁴*

*1 Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, oaestrad@gmail.com, 2 Profesor Asociado, jivelezu@unal.edu.co,
3 Profesora Asociada, mvvelez@bt.unal.edu.co, 4 Estudiante de Doctorado, cart170@gmail.com.
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín,
Colombia.*

RESUMEN:

En este artículo se presenta una metodología de modelación acoplada de aguas superficiales y subterráneas a partir de la integración de un modelo de flujo subterráneo (MODFLOW) con un modelo hidrológico que permite estimar la producción de escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos, para tener una aproximación cuantitativa de la interacción río-acuífero y que sirva como herramienta de apoyo para tomar decisiones en la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.. Con este trabajo se pretende considerar de forma conjunta el régimen de caudales, las características del acuífero y las corrientes superficiales, la recarga del acuífero, e intervenciones antrópicas como captaciones superficiales y subterráneas. La metodología de modelación acoplada ha sido implementada en casos teóricos de aplicación, para diferentes escenarios de simulación que se presentan en situaciones prácticas. Los resultados de la modelación permiten cuantificar el grado de afectación que tiene la explotación del acuífero sobre los caudales base de los ríos y el intercambio de volúmenes de agua entre el acuífero y el río.

ABSTRACT:

This paper presents the development of a surface and ground-water coupled modeling methodology, by means of the integration of a hydrological model and the ground-water model MODFLOW, in order to obtain a quantitative approach to the stream-aquifer interactions and to support a practical methodology that will allow an efficient resource management. This work aims to jointly consider the flow regime, the characteristics of the aquifer and streams, aquifer recharge, and human interventions such as surface and ground-water extraction. The coupled modeling methodology was implemented in theoretical application cases for different simulation scenarios in practical situations. The modeling results quantify the impact level that ground-water pumping has over the river's base-flow and the water exchange between the aquifer and river.

PALABRAS CLAVES:

Interacción río-acuífero, MODFLOW, Modelo Hidrológico.

INTRODUCCIÓN

El manejo eficiente y racional del agua en una cuenca hidrográfica requiere en algunos casos de la utilización conjunta de recursos superficiales y subterráneos, lo cual es un elemento clave en la gestión integral del agua. Aunque la interacción entre aguas superficiales y subterráneas toma muchas formas, la explotación de un acuífero puede provocar el agotamiento de los caudales en los ríos por el bombeo inducido, lo cual se convierte en algo crítico por sus implicaciones administrativas, económicas, legales y ambientales (Pulido *et al.*, 2005). En muchos casos, la gestión del recurso hídrico en Colombia ha considerado las aguas superficiales y subterráneas como recursos distintos e independientes, omitiendo la conectividad física presente entre ambos sistemas, y generando una reglamentación desarticulada para el aprovechamiento del mismo. Por esto es importante que las autoridades ambientales cuenten con estrategias metodológicas adecuadas para la gestión eficiente del agua, a partir de herramientas de modelación prácticas.

El desarrollo inicial de soluciones analíticas para tratar de abordar el problema de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas estuvo enfocado en la disminución del caudal de un río debido al bombeo de agua subterránea, para acuíferos ideales de extensión infinita o semi-infinita, perfectamente o parcialmente conectados a la corriente (Theis, 1941; Glover y Balmer, 1954; Hantush, 1965; Hunt, 1999). Algunos otros modelos analíticos, como el modelo unicelular y los modelos pluricelulares englobados (Sahuquillo, 1983 y Pulido *et al.*, 2005), consideran que el acuífero puede ser representado como un embalse o conjunto de embalses, cuyas características varían según las suposiciones propias de cada método. Los modelos numéricos como el MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) son ampliamente utilizados en estudios hidrogeológicos y algunos de sus módulos han sido desarrollados para representar la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo, este enfoque de modelación para el manejo de un acuífero no considera adecuadamente la variabilidad espacial y temporal de procesos hidrológicos como la recarga de los acuíferos, la evapotranspiración real, los caudales en los ríos, entre otros. Por tal razón, algunos autores han propuesto realizar una modelación acoplada, integrando modelos de aguas superficiales y de aguas subterráneas (Sophocleous *et al.*, 1999; Sokrut, 2005; Markstrom *et al.*, 2008).

En este trabajo se presenta una metodología acoplada de modelación de aguas superficiales y subterráneas a partir de la integración de un modelo hidrológico (Modelo de Tanques Agregado) que da cuenta de la producción de escorrentía en la cuenca y recarga del acuífero, y el modelo de aguas subterráneas MODFLOW, el cual permite simular de forma precisa la dinámica del agua subterránea, las perturbaciones externas que se presentan en el acuífero como pozos de extracción o inyección, y es capaz de representar adecuadamente la interacción río-acuífero utilizando un paquete que ha sido desarrollado para el tránsito de caudales en corrientes superficiales.

El enfoque principal de esta propuesta metodológica consiste en que una vez realizada la modelación hidrológica de la cuenca de estudio, se obtienen las series de los caudales simulados en la corriente principal y de la recarga del acuífero. En el modelo de aguas subterráneas se definen las propiedades del acuífero y las condiciones de frontera. Los caudales superficiales resultantes de la modelación hidrológica son transitados en MODFLOW usando el paquete Stream (Prudic, 1989), el cual puede utilizarse en una o más corrientes superficiales que interactúan con el acuífero. La serie de recarga es ingresada al modelo de aguas subterráneas como un dato de entrada distribuido en el espacio. Esto permite que un proceso determinante en la hidrología de una cuenca y uno de los más difíciles de estimar, no sea especificado en el modelo como un parámetro que debe ser determinado por calibración, sino un resultado de la simulación hidrológica. Los resultados de la modelación permiten cuantificar el grado de afectación que tienen las captaciones subterráneas sobre los caudales base de los ríos, la disminución del volumen disponible por causa de la explotación del acuífero y la afectación de todas estas intervenciones antrópicas en el intercambio de volúmenes de

agua entre las corrientes superficiales y las aguas subterráneas. La metodología de modelación acoplada ha sido implementada en casos teóricos de aplicación, ya que ha sido difícil tener información hidrogeológica de calidad suficiente para tener una aplicación en un caso real. Los casos teóricos fueron implementados con el objetivo de poner a prueba el desempeño de los modelos utilizados y se realizaron diferentes escenarios de simulación que comúnmente se presentan en problemas hidrogeológicos.

MODELOS UTILIZADOS

El modelo de tanques agregado adaptado del modelo TETIS presentado por Vélez (2001) y Francés *et al.* (2002 y 2007), es un modelo que ha sido implementado para la estimación de caudales diarios en cuencas con información escasa, el cual reproduce valores de escorrentía superficial directa en un lapso de tiempo definido por los periodos de precipitación que se tengan en la cuenca. El modelo busca representar por medio de un sistema de tanques interconectados entre sí, los procesos determinantes en la producción de la escorrentía. La representación de cada uno de estos procesos se puede realizar desde un punto de vista físico, y con algunas relaciones empíricas obtenidas de mediciones en el laboratorio o de mediciones puntuales en el campo. Estas ecuaciones son acopladas para definir las cantidades de agua que cada elemento transfiere a sus vecinos (horizontal y verticalmente) en un intervalo de tiempo. El modelo empleado para la simulación de caudales y la producción de escorrentía se basa en el balance hídrico en la cuenca, asumiendo que el agua se distribuye en cuatro tanques o niveles de almacenamiento conectados entre sí, como puede observarse en la Figura 1.

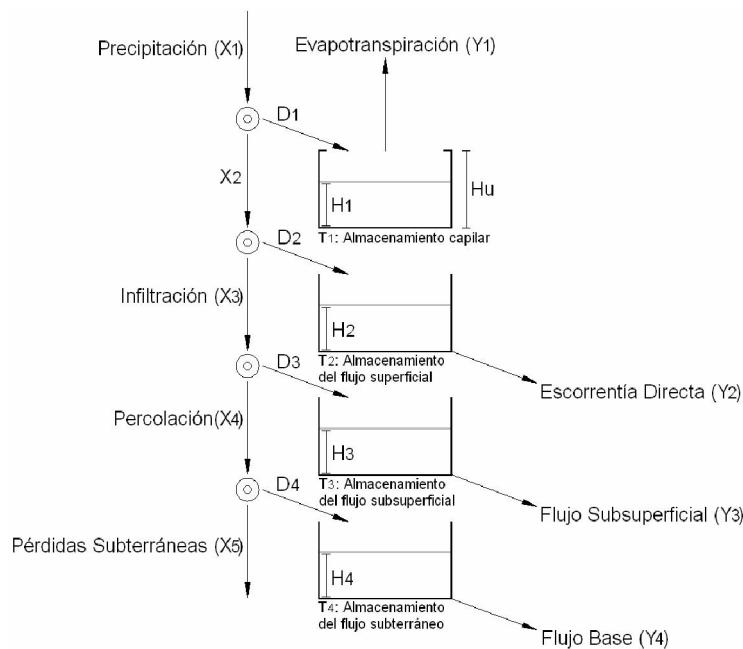


Figura 1.- Esquema general del modelo de tanques agregado (tomada de Amaya *et al.*, 2009).

El MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) es un modelo de dominio público desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (*USGS* por sus siglas en inglés), el cual soluciona las ecuaciones de flujo subterráneo mediante un esquema numérico en diferencias finitas. El modelo tiene una estructura modular que consiste de un programa principal y una serie de subrutinas en paquetes. Cada paquete representa alguna característica específica del sistema hidrológico como recarga, evapotranspiración, ríos y drenes. Este modelo ha sido utilizado para estudiar las interacciones de aguas superficiales y aguas subterráneas, a partir de algunos módulos que han sido desarrollados para lograr este objetivo, tales como el River y Drain (McDonald y Harbaugh, 1988), y el paquete Stream (Prudic, 1989).

El paquete de recarga en MODFLOW simula la recarga distribuida en toda el área del acuífero, y se presenta como la recarga neta por unidad de área que es aplicada en una celda. Es importante decir que no es posible en MODFLOW calcular la recarga neta por precipitación, o dentro de alguno de sus módulos adicionales. Por lo tanto, la recarga debe ser ingresada al modelo como un dato conocido, o como un parámetro que debe ser determinado por calibración. Existen diferentes metodologías en la literatura para cuantificar la variabilidad espacial y temporal de la recarga, pero elegir las apropiadas es a menudo difícil (Scanlon *et al.*, 2002). Para esta metodología de modelación se propone estimar la recarga a partir de la simulación hidrológica de la cuenca de estudio usando el modelo de tanques agregado. Una ventaja con este enfoque metodológico es que la recarga calculada a partir de la simulación superficial es relativamente sencilla de estimar, guarda coherencia con los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca, reproduce resultados razonables y disminuye algunas subjetividades propias del modelo de calibración automática.

El paquete Stream (STR1) (Prudic, 1989) es una modificación del paquete River (RIV), descrito por McDonald y Harbaugh (1988), para el tránsito de caudales a través de uno o más ríos, y que permite calcular el intercambio de flujo entre las corrientes superficiales y el acuífero. El tránsito de caudales dentro del paquete STR1 está basado en la ecuación de continuidad y la hipótesis de flujo permanente, uniforme y densidad constante. El balance de agua para cada tramo de río, así como la tasa de goteo entre el tramo de río y la correspondiente celda del modelo, son calculados durante cada paso de tiempo usado en MODFLOW. Estos cálculos son realizados independientes del balance de agua en el modelo de aguas subterráneas. Conceptualmente, el flujo entre ríos y acuíferos en el modelo de aguas subterráneas es calculado a partir de la ley de Darcy, asumiendo flujo uniforme entre el río y el acuífero sobre una sección de la corriente superficial y el correspondiente acuífero. Este flujo de transferencia es calculado como:

$$Q_r = \frac{K \cdot w \cdot L}{m} (h_r - h_a) \quad [1]$$

donde Q_r [L^3/T] es el flujo entre el río y el acuífero (positivo para descarga del río hacia el acuífero, y negativo para flujo del acuífero hacia el río), K [L/T] es la conductividad hidráulica de los sedimentos del lecho, L [L] es la longitud del tramo de río, w [L] es el ancho del canal, m [L] es el espesor del material del lecho del río, h_r [L] es el nivel del río, y h_a [L] es el nivel piezométrico en el acuífero.

METODOLOGÍA DE MODELACIÓN ACOPLADA

La metodología de modelación propuesta pretende considerar de forma conjunta el régimen de caudales, las características del acuífero, la hidrología local en la zona de recarga y las intervenciones antrópicas de la cuenca como captaciones superficiales y pozos de explotación o inyección. El modelo de tanques agregado permite de forma práctica y sencilla, simular caudales para una cuenca de área conocida, en la cual se conoce la evapotranspiración potencial y la lluvia diaria como datos de entrada para la simulación de escorrentía. De esta forma, la simulación de caudales se puede realizar para cuencas que tengan estaciones con registros (calibración del modelo), así como para puntos donde no se tienen registros pero en los cuales se conocen los parámetros del modelo, lo que implica suponer los datos de entrada al modelo basándose en las diferentes calibraciones realizadas.

La recarga natural de los acuíferos comprende la que produce la lluvia a través del suelo (recarga difusa), la que se produce en la interacción con corrientes superficiales (recarga concentrada) y la que procede de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas (Custodio *et al.*, 1997). La cantidad de recarga que ingresa al acuífero por precipitación depende de diferentes variables (evapotranspiración, propiedades del suelo, espesor de la zona no saturada, etc.), y esto hace que sea

un proceso muy difícil de determinar. En el modelo hidrológico agregado, el almacenamiento subterráneo se representa por un tanque donde se considera el almacenamiento del agua gravitacional mientras fluye a través del interior del suelo hacia la red de drenaje, en lo que se podría considerar como el acuífero, y donde sale a formar el flujo base. El volumen de agua que durante el intervalo de tiempo ingresa por percolación X_i tiene la posibilidad de que una cantidad de agua siga hacia las pérdidas subterráneas X_j y que el resto sea derivado hacia el almacenamiento subterráneo TA (Figura 1). De esta forma, se obtiene una serie para la recarga difusa con la cantidad de agua que se deriva para el almacenamiento del flujo subterráneo durante cada paso de tiempo.

Las series obtenidas con el modelo hidrológico en la cuenca de estudio para los caudales y la recarga difusa poseen una resolución temporal diaria. De esta manera se propone acoplar ambos sistemas, teniendo en cuenta que el objetivo para la modelación es de largo plazo (superior a 10 años), y no la simulación de eventos de corto plazo (horas a días) en los cuales se presentan cambios considerables de los caudales de los ríos, esto dado que nuestro objeto de estudio se encuentra dirigido al entendimiento del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas el cual es crítico en épocas de escasez donde la variabilidad diaria de los caudales es menor.

Para el modelo de aguas subterráneas en MODFLOW se deben definir las propiedades del acuífero, la discretización espacial de la malla, las condiciones de frontera del modelo (ríos, recarga, pozos de bombeo, zonas impermeables, etc.) y las propiedades de los ríos que atraviesan el acuífero (espesor y conductividad hidráulica del lecho, rugosidad y pendiente del tramo). La serie agregada de caudales simulados es un dato de entrada para realizar el tránsito de caudales en el río usando el paquete STR1 para MODFLOW, y la serie de recarga difusa estimada es ingresada al modelo de aguas subterráneas como un dato de entrada distribuido en el espacio. Los resultados de la modelación entregan un balance de flujos entre el río y el acuífero para cada paso de tiempo en todos los tramos del río.

CASOS DE APLICACIÓN

Para este trabajo se ha desarrollado un problema teórico con base en la información hidrológica de una cuenca instrumentada y un acuífero idealizado ubicado en la parte baja de esta, el cual es atravesado por un río y en el cual se tiene un pozo de bombeo, tal como se muestra en la Figura 2. El enfoque propuesto para este caso teórico de aplicación consiste en suponer que se tiene un acuífero libre, rectangular, homogéneo e isotrópico, que tiene 50 m de espesor, y una longitud de 5000 m en cada uno de sus lados. Se asume también que la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero son constantes en el espacio y el tiempo.

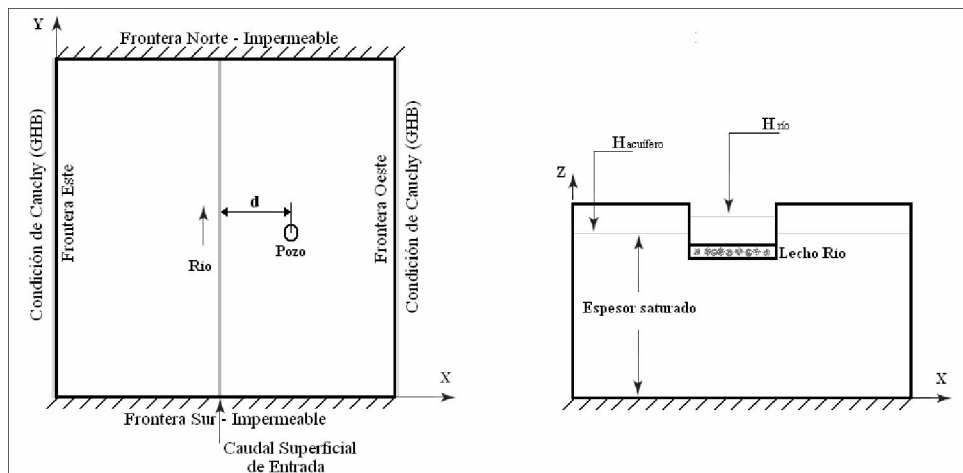


Figura 2.- Esquema del acuífero rectangular atravesado por un río y condiciones de frontera del caso de aplicación

La simulación hidrológica de este caso teórico de aplicación se realizó con información hidrológica de la cuenca del río Turbo, ubicada en el Uraba Antioqueño (occidente de Colombia). La calibración del modelo de tanques agregado se realizó con base en la propuesta metodológica presentada en Amaya *et al.* (2009). Por lo tanto, con los parámetros de calibración de la serie de caudal de la estación El Dos, se realizó la simulación hidrológica para un periodo de 10 años (1987-1996) y se obtuvieron las series de caudales diarios superficiales y de recarga diaria del acuífero. En la Figura 3 se presentan las curvas de duración de caudales de las series simuladas y observadas de la estación de caudal, así como la serie de recarga diaria acumulada.

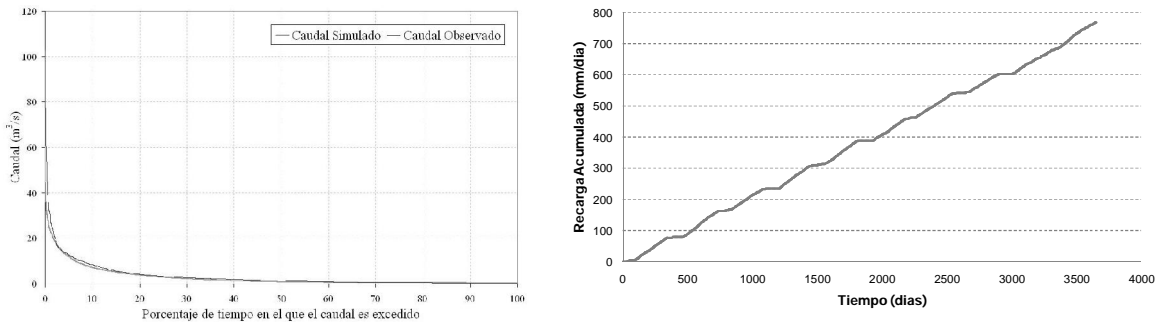


Figura 3- Curva de duración de caudales de las series simuladas y observadas en la estación El Dos (izquierda) y serie diaria de recarga acumulada utilizada en el procedimiento de simulación (derecha)

ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

El objetivo con esta primera aproximación en casos que comúnmente se presentan en el campo de la hidrogeología es cuantificar el impacto que tiene la explotación del agua subterránea sobre los caudales mínimos en el río, el flujo base y las descargas del río al acuífero, teniendo en cuenta la distancia del pozo con respecto al río para un mismo caudal de bombeo y la variación de los caudales de extracción para un mismo sitio de bombeo. Se asumieron valores de 10 m/d y 1 m/d para las conductividades hidráulicas del acuífero y del lecho río respectivamente. Se escogieron como caudales de bombeo los correspondientes al flujo base del río (240 l/s), el 50 % de ese caudal base (120 l/s) y el caudal correspondiente a la recarga del acuífero (60 l/s). El pozo de bombeo fue ubicado en la mitad del acuífero sobre la margen derecha del río que lo atraviesa (Figura 2), correspondiente a la abscisa 2500 m sobre el eje del cauce. Para todos los casos simulados se identificaron los caudales mínimos en diferentes tramos del río para analizar la evolución de estos a lo largo del río, correspondiente al día 03/04/1995, así como los caudales involucrados en la interacción río-acuífero y un rastreo de partículas usando MODPATH (Pollock, 1994) para definir la zona de captura del pozo de bombeo. De esta manera se pueden analizar los efectos espaciales de la extracción subterránea.

RESULTADOS

Simulación para diferentes ubicaciones del pozo de bombeo

Se realizaron simulaciones del sistema en estado natural (sin bombeo) y los respectivos casos de simulación para un pozo de explotación ubicado a 200 m, a 500 m y a 1000 m del río, con un caudal de bombeo constante de 60 l/s, el cual corresponde a la recarga media anual sobre el acuífero. Se presentan también los efectos sobre el río que tendría una captación superficial que está aprovechando un caudal de 60 l/s (igual al caudal de bombeo). En la Figura 4 se presentan los caudales mínimos a lo largo del río, para el régimen natural y los caudales mínimos resultantes como consecuencia de la explotación de agua subterránea en las diferentes ubicaciones del pozo de bombeo. También se presentan los caudales mínimos a lo largo del río que resultan del aprovechamiento de agua superficial con una captación ubicada a la altura del eje del pozo.

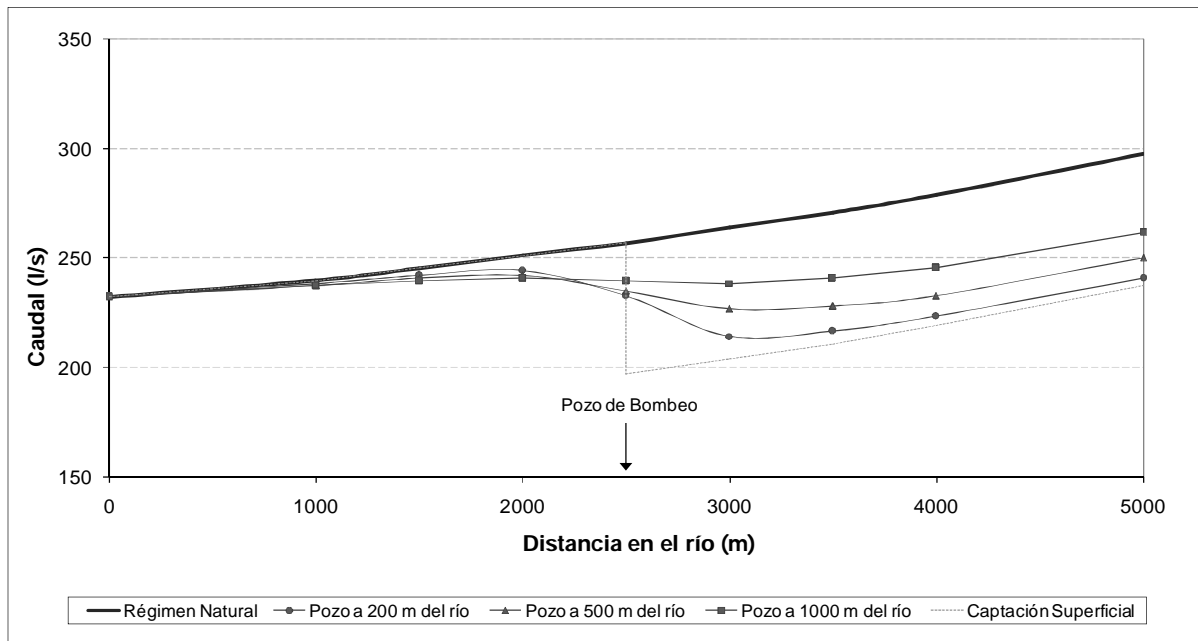


Figura 4- Caudales mínimos a lo largo del río en régimen natural, para todas las ubicaciones de los pozos de bombeo y captación superficial

En la Figura 4 se puede observar la afectación sobre los caudales mínimos a lo largo del río que tiene la explotación de agua subterránea para las diferentes ubicaciones del pozo de bombeo, tanto en el tramo aguas arriba del eje de bombeo, como en el tramo aguas abajo del mismo. En el tramo aguas arriba del eje de bombeo se observa que los pozos que se encuentran más alejados del río tienen un mayor impacto sobre los caudales superficiales (pozos de bombeo a 1000 m y a 500 m del río). La tendencia de esta afectación sobre los caudales superficiales presenta un cambio cerca del tramo adyacente al eje de bombeo, en la abscisa 2300 m aproximadamente, en la cual el pozo de bombeo ubicado a 200 m del río comienza a tener impactos mayores sobre los caudales mínimos en el río hacia aguas abajo. De esta manera, se puede observar que la afectación sobre los caudales mínimos, desde el tramo adyacente al eje de bombeo hacia los tramos aguas abajo, es mayor dependiendo de la cercanía que tiene el pozo de explotación con respecto al río, lo cual podría indicar que a partir de ese punto los pozos están extrayendo directamente del río parte del caudal explotado.

En la Figura 5 se presentan las zonas de captura para las diferentes ubicaciones del pozo de bombeo, las cuales fueron determinadas a partir de un rastreo hacia atrás de partículas (Backward Traking) usando MODPATH. La trayectoria de cada una de estas partículas fue calculada para todo el periodo de simulación. Los resultados para las zonas de captura en los distintos sitios de bombeo permiten observar como a medida que el pozo se encuentra más alejado del río, la zona de captura es mayor, teniendo en cuenta que el caudal de bombeo es el mismo para todos los casos. Lo anterior se presenta debido a los efectos que causa el río como condición de frontera en el acuífero sobre la trayectoria de las partículas, y se puede observar como para el pozo ubicado a 200 m, la zona de captura presenta un evidente distorsión en su forma, la cual posiblemente puede explicarse debido a su cercanía con el río.

La estimación de las zonas de captura permite inferir indirectamente el radio de influencia o afectación que tiene el pozo de bombeo durante todo el periodo de simulación, tanto en el acuífero como en el tramo del río. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede explicar de forma intuitiva los resultados mostrados en la Figura 4, en la cual se observa como el pozo que se encuentra más alejado del río tiene mayores impactos sobre el tramo aguas arriba del eje de bombeo.

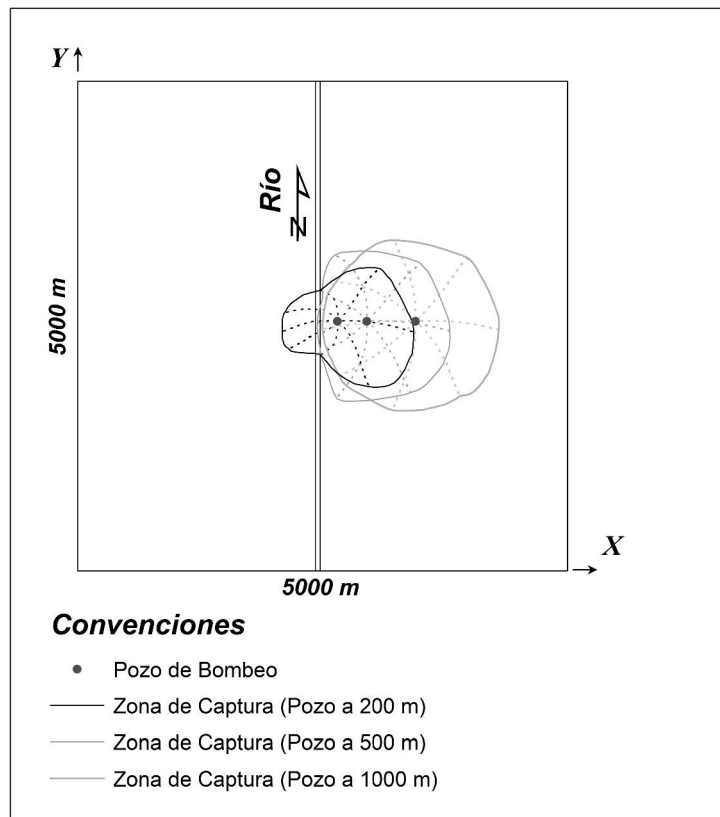


Figura 5.- Zona de captura para diferentes ubicaciones del pozo para un caudal de bombeo de 60 l/s

En la Figura 6 se presentan los caudales de transferencia río-acuífero calculados sobre el eje de ubicación del pozo en el acuífero (abscisa 2500 m, Figuras 6c y 6d), 1500 m aguas arriba (abscisa 1000 m, Figuras 6a y 6b) y aguas abajo de ese tramo (abscisa 4000 m, Figuras 6e y 6f), para los casos de simulación en régimen natural, y de los pozos que se encuentran ubicados a 200 m y a 1000 m del río, con el fin de analizar los efectos que tiene la distancia de bombeo sobre la dinámica natural de estos flujos.

En los resultados presentados en la Figura 6 se puede observar el comportamiento de los flujos río-acuífero a lo largo del río, y claramente se observa la recarga inducida por la explotación del acuífero, la cual es mucho mayor en el tramo adyacente al pozo de bombeo. Tanto en el tramo aguas arriba como aguas abajo del eje de bombeo se puede observar la afectación que tiene la explotación de aguas subterráneas sobre el régimen natural de estos caudales involucrados en la interacción río-acuífero. También se puede observar como para el pozo de bombeo ubicado a 200 m en el periodo de simulación no se presentan descargas del acuífero al río en el tramo adyacente, debido a que bombeo ha alterado completamente la dinámica natural los caudales entre ambos sistemas.

Simulación para diferentes caudales de bombeo

Para los caudales de bombeo escogidos (60 l/s, 120 l/s y 240 l/s) se realizaron escenarios de simulación para un pozo ubicado a 500 m del río, teniendo en cuenta que esta ubicación del pozo en el acuífero permite estimar los impactos sobre los caudales en el río para las diferentes tasas de bombeo. Se presentan también los efectos que sobre el río tendría una captación superficial con un caudal igual a cada uno de los caudales de bombeo en el pozo ubicado a 500 m.

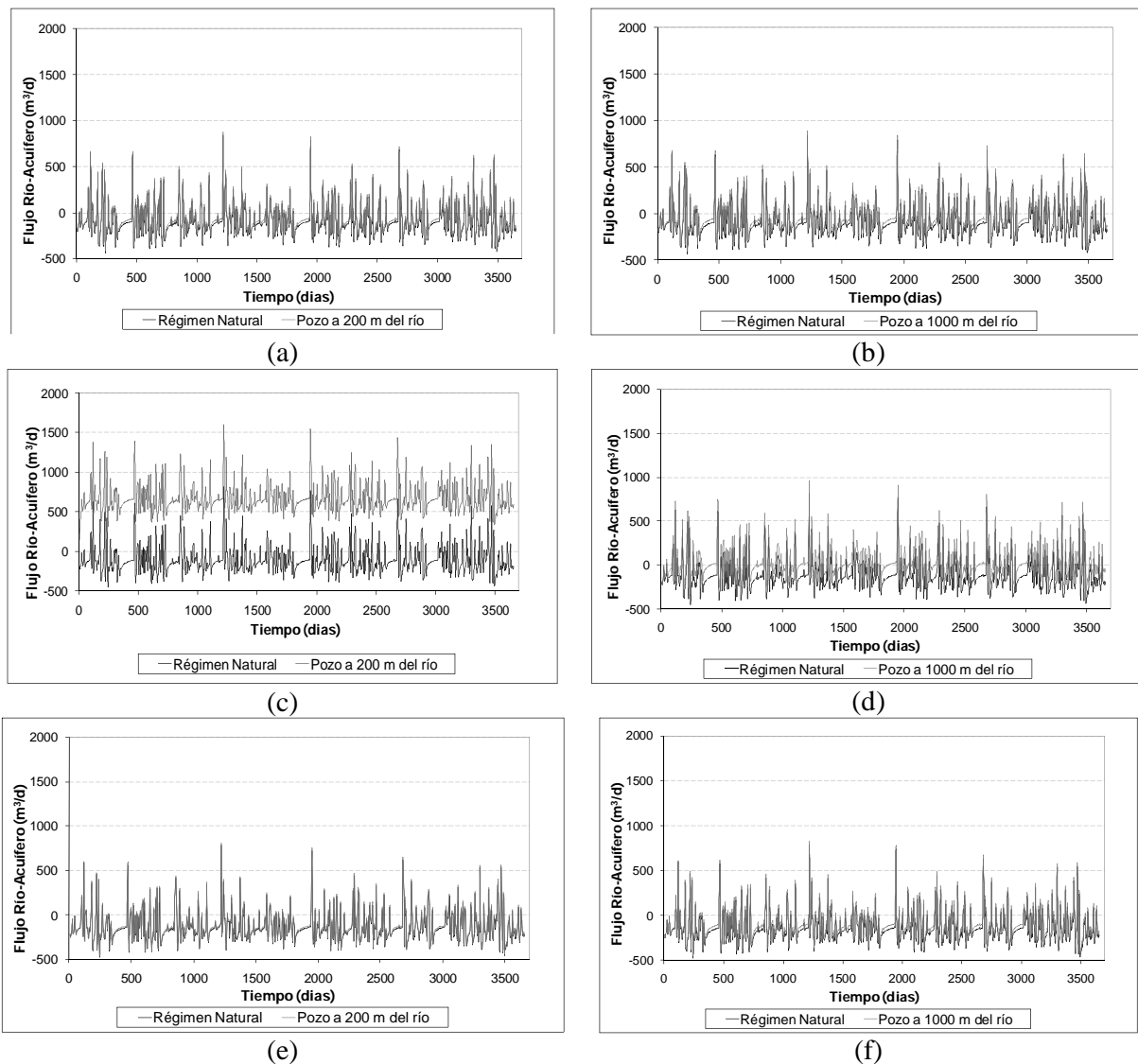


Figura 6.- Flujos río-acuífero en el tramo 1500 m aguas arriba del eje del pozo (a y b), en el tramo adyacente al eje del pozo (c y d), y en el tramo 1500 m aguas abajo del eje del pozo (e y f).

Los resultados que se presentan en la Figura 7 para este escenario de simulación muestran de forma cuantitativa que la disminución de los caudales en el río depende directamente de la tasa de explotación de agua subterránea en el acuífero. También se puede observar como el aprovechamiento del agua subterránea presenta una disponibilidad adicional del recurso frente a la utilización de agua superficial, ya que en todos los casos, los caudales mínimos resultantes del aprovechamiento subterráneo son mayores, a lo largo del río, que los caudales mínimos remanentes debido a la captación superficial.

En la Figura 8 se presentan los caudales mínimos en el río para el escenario de explotación del acuífero para un caudal de bombeo de 240 l/s, así como los caudales mínimos resultantes a partir de la captación superficial de 240 l/s ubicada en el río sobre eje del pozo de bombeo. También se presentan los caudales ecológicos a lo largo de todo el río. Para la estimación de los caudales ecológicos se empleó la metodología propuesta en la Resolución 0865 del 22 de Julio de 2004 publicada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, la cual cita el Estudio Nacional de Aguas (IDEAM, 2000).

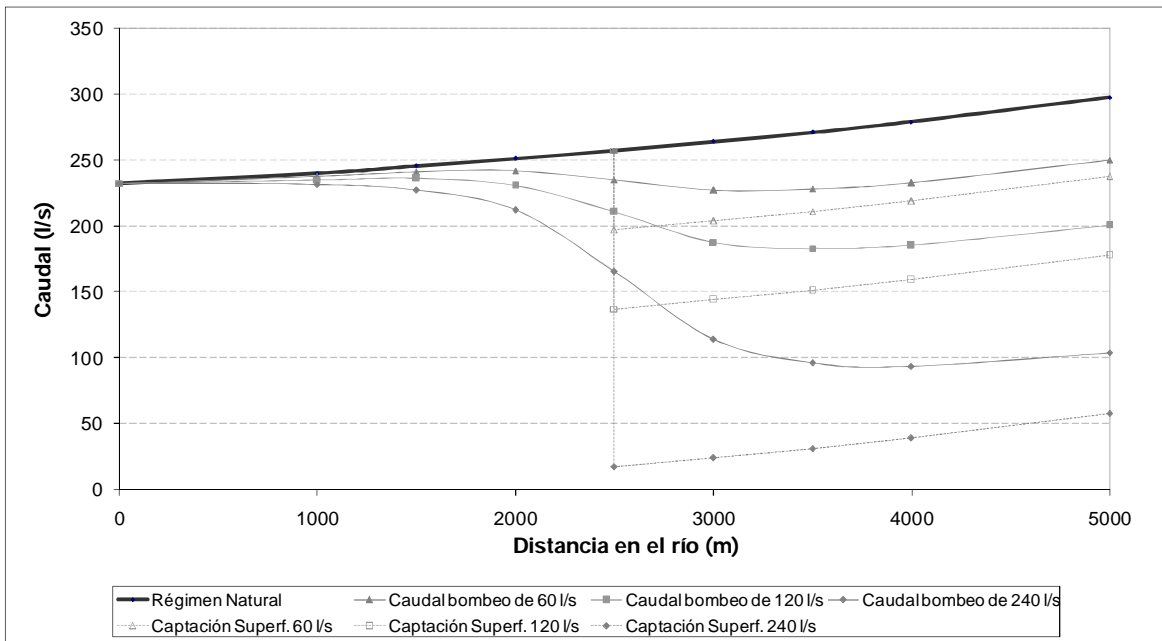


Figura 7.- Caudales mínimos a lo largo del río en régimen natural, para todos los caudales de bombeo y captaciones superficiales

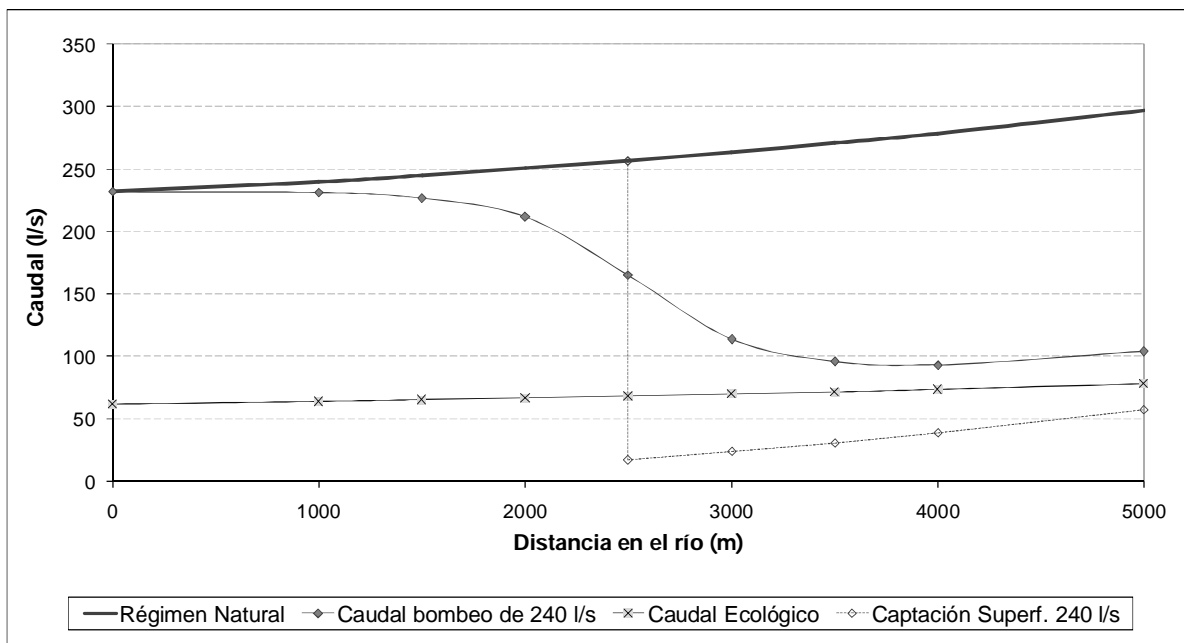


Figura 8.- Caudales mínimos a lo largo del río en régimen natural, para el pozo de bombeo y captación superficial de 240 l/s, y caudales ecológicos

A partir de los resultados que se presentan en la Figura 8 se puede observar como la explotación del acuífero con un caudal de bombeo igual al flujo base (240 l/s) afecta considerablemente los caudales mínimos a lo largo del río, y se presenta una disminución del 55% en el tramo adyacente al río (abscisa 2500 m) y del 80% al finalizar el tramo de río en el acuífero. Para este caso de simulación también se puede observar como el aprovechamiento del agua subterránea ofrece una disponibilidad adicional del recurso sobre la captación superficial, y aunque es crítica la disminución de los caudales mínimos por el bombeo en todo el tramo del río, no alcanza a impactar sobre los caudales ecológicos estimados. Así mismo, se muestra como para el caso de un aprovechamiento de agua superficial son afectados los caudales ecológicos aguas abajo del sitio de captación, lo cual tiene graves consecuencias sobre la disponibilidad del recurso para posibles

usuarios que se encuentran aguas abajo, y algunos ecosistemas que habitan el río y la interfaz acuífero-río.

En la Figura 9 se presentan los resultados para el rastreo de partículas ubicadas en el pozo para los diferentes caudales de bombeo, en las cuales se puede observar la zona de captura para los casos de explotación. La trayectoria de cada una de estas partículas fue calculada para todo el periodo de simulación. Al igual que en la Figura 7, se puede observar el impacto que tiene la extracción de agua subterránea cerca del río sobre los caudales superficiales, tanto en el tramo aguas arriba y aguas abajo del eje de ubicación del pozo, y en el tramo adyacente. Las zonas de captura estimadas para cada tasa de bombeo muestran claramente como esa afectación es directamente proporcional al caudal explotado por el pozo ubicado a 500 m del río.

Los resultados obtenidos con esta herramienta para el rastreo de partículas pueden ayudar a entender los impactos, desde el punto de vista espacial en el acuífero y a lo largo del río, generados por la explotación de agua subterránea, ya que no solamente se presenta una afectación del recurso en el sitio adyacente al pozo de bombeo sino también aguas arriba y aguas abajo de este. Estos resultados deben ser analizados, no solamente en términos del problema de cantidad del recurso hídrico, sino también como un problema de calidad, teniendo en cuenta que en caso de presentarse un aprovechamiento intensivo de agua subterránea cerca de un río altamente contaminado, muy probablemente la recarga inducida del río al acuífero por el bombeo termina afectando la calidad del recurso disponible en el acuífero.

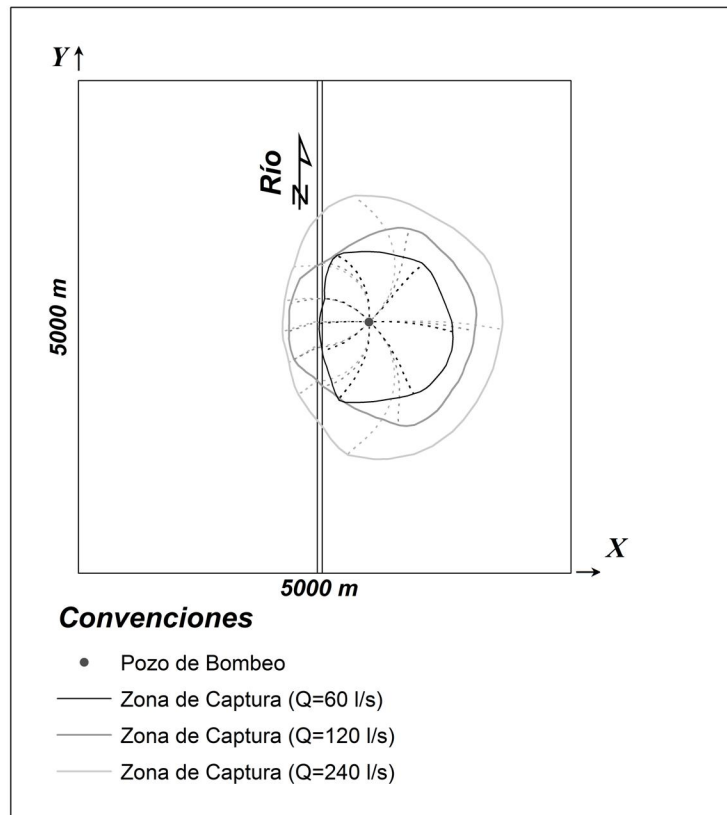


Figura 9.- Zona de captura para diferentes caudales de bombeo en un pozo ubicado a 500 m del río

En la Figura 10 se presentan los caudales de transferencia río-acuífero calculados sobre el eje de ubicación del pozo en el acuífero (abscisa 2500 m, Figuras 10c y 10d), 1500 m aguas arriba (abscisa 1000 m, Figuras 10a y 10b) y aguas abajo de ese tramo (abscisa 4000 m, Figuras 10e y 10f), para los casos de simulación en régimen natural, y para los caudales de bombeo de 60 l/s y 240 l/s, con el

fin de analizar los efectos que tiene el régimen de explotación del acuífero sobre la dinámica natural de estos flujos. Se puede observar como en el tramo adyacente al eje de bombeo se presenta para ambos caudales de explotación una evidente alteración de los caudales río-acuífero naturales, así como un impacto menor sobre estos en los tramos aguas arriba y aguas abajo del sitio de bombeo.

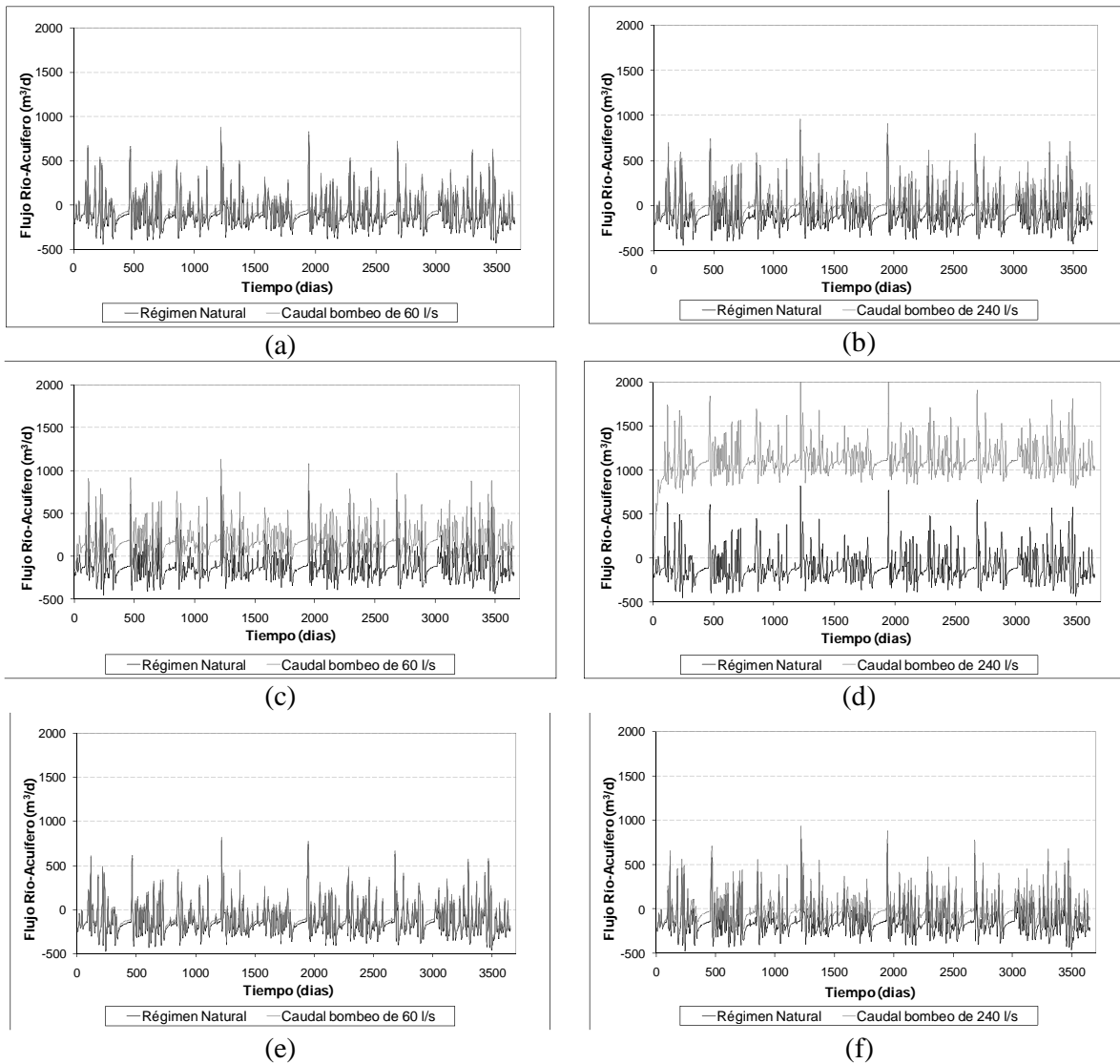


Figura 10- Flujos río-acuífero en el tramo 1500 m aguas arriba del eje del pozo (a y b), en el tramo adyacente al eje del pozo (c y d), y en el tramo 1500 m aguas abajo del eje del pozo (e y f).

En la Figura 10 se puede observar que la recarga inducida por el caudal de bombeo de 240 l/s con el pozo ubicado a 500 m del río, ha alterado completamente el régimen natural de las descargas entre ambos sistemas ya que no se presenta flujo base del acuífero al río. Para el caso del caudal de bombeo correspondiente a 60 l/s, es evidente que se presenta una recarga adicional al acuífero por parte del río como consecuencia del bombeo, pero en algunos periodos de tiempo se presenta aporte del acuífero al río, aunque de menor magnitud con respecto al flujo base que entrega el acuífero al río en régimen natural.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología de modelación acoplada de aguas superficiales y subterráneas, integrando un modelo hidrológico y el modelo de aguas subterráneas MODFLOW,

para tener una aproximación cuantitativa de la interacción río-acuífero en un caso de aplicación teórico. La propuesta metodológica de modelación permite considerar de forma conjunta los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca, la variabilidad temporal de la recarga, las características hidrogeológicas del acuífero e hidráulicas de las corrientes superficiales, el aprovechamiento del agua superficial y subterránea, y los impactos que tiene el uso del recurso hídrico sobre ambos sistemas. Se propone para la modelación del sistema acoplado que la recarga por lluvia, obtenida con el modelo de tanques agregado, ingrese al acuífero en el modelo de aguas subterráneas como un resultado de la simulación hidrológica de la cuenca y no como un parámetro de calibración.

Los resultados obtenidos en la modelación muestran como para un acuífero que tiene unas características geométricas e hidrogeológicas determinadas, la disminución en los caudales superficiales debida a la extracción de aguas subterráneas tiene una alta dependencia con la distancia del pozo respecto al río y con el caudal explotado. Además fue posible cuantificar la interacción río-acuífero, así como la recarga inducida del río al acuífero por el bombeo a partir de los caudales de transferencia entre ambos sistemas.

Para los escenarios de simulación implementados, los resultados de la modelación permiten cuantificar el impacto que tiene la explotación del acuífero sobre los caudales superficiales, y han mostrado coherencia espacial, temporal y en magnitud de la afectación, aunque estas respuestas del sistema río-acuífero deberán ser comprobadas con casos reales de aplicación.

En los resultados obtenidos se evidencia las ventajas que ofrece el aprovechamiento del acuífero, en términos de cantidad, con respecto al agua superficial. También es importante decir que el almacenamiento del recurso hídrico en el embalse subterráneo es gratuito, permite utilizar el suelo que está sobre este, y en la mayoría de casos el acuífero funciona como una planta de tratamiento natural del agua, lo cual es una ventaja adicional en términos de calidad.

Aunque la modelación acoplada del sistema presenta resultados cuantitativos de la interacción río-acuífero, tanto en régimen natural como para condiciones de explotación superficial y subterránea, estos deben ser analizados no solo en términos de cantidad del recurso hídrico, sino también como un problema de calidad del agua. En el caso de una sobre-explotación del acuífero con pozos ubicados cerca de un río con problemas de contaminación, probablemente la recarga inducida del río al acuífero por el bombeo termina afectando la calidad del recurso disponible en el acuífero.

Los casos de aplicación presentados son una primera aproximación en el desarrollo de una metodología de modelación, la cual debe convertirse en una herramienta que permita cuantificar el impacto que tiene el aprovechamiento del agua sobre ambos sistemas, y entender las dinámicas presentes en la interacción río-acuífero.

AGRADECIMIENTOS

A COLCIENCIAS y al Grupo Red de Cooperación en Investigación sobre el Agua (GRECIA) por financiar este proyecto de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaya, G., C. Restrepo-Tamayo, M. Vélez, J.I. Vélez y O. Álvarez-Villa (2009). "Modelación del Comportamiento Hidrológico de Tres Cuencas en el Urabá Antioqueño – Colombia". *Avances en Recursos Hidráulicos*. Universidad Nacional de Colombia. 19, 21-38.

Custodio, E. (1997). "Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre". En: "La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica". Editado por: Custodio E., Llamas

- M. R. y Samper J. Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Español e Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 455p.
- Francés, F., J.I. Vélez, J.J. Vélez y M. Puricelli** (2002). “Distributed Modeling of Large Basins for Real Time Flood Forecasting System in Spain”. *Second Federal Interagency Hydrologic Modelling*. Conferencia. Las Vegas, USA. Memorias en CD.
- Francés, F., J.I. Vélez, J.J. Vélez** (2007). “Split-Parameter Structure for the Automatic Calibration of Distributed Hydrological Models”. *J. Hydrol.* 332, 226-240.
- Glover, R.E., Balmer, G.G.** (1954). “Stream depletion resulting from pumping a well near a stream”. *Eos Trans. AGU* 35 (3), 468–470.
- Hantush, M.S.** (1965). “Wells near streams with semipervious beds”. *J. Geophys. Res.* 70 (12), 2829–2838.
- Hunt, B. (1999)**. “Unsteady stream depletion from groundwater pumping”. *Ground Water* 37 (1), 98–102.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM.** (2000). “Estudio Nacional del Agua”. 39p.
- Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., and Barlow, P.M.** (2008). “GSFLOW—Coupled ground-water and surface-water flow model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005)”. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 240 p.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W.** (1988). “A modular three-dimensional finite-difference ground-water model”. *US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1, 586pp.
- Pollock, D.W.** (1994). *User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464.
- Prudic, D.E.** (1989). “Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite difference, ground-water flow model”. *U.S. Geological Survey Open-File Report* 88-729, 113 p.
- Pulido-Velázquez, M.A., Sahuquillo-Herraiz, A., Ochoa-Rivera, J.C. and Pulido-Velázquez, D.** (2005) “Modeling of stream-aquifer interaction: the embedded multireservoir model”. *Journal Of Hydrology*, 313, 166-181
- Sahuquillo, A.** (1983). “Modelos Pluricelulares Englobados”. *En Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas, B-4, Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia, España*, 1–7.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W. y Cook, P. G.** (2002). “Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge”. *Hydrogeology Journal*. 10: 18-39.
- Sokrut, N.** (2005). “The integrated distributed hydrological model, Ecoflow- a tool for catchment management”. PhD. Thesis. Swedish Water Management Research Programme.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygar, S.R., Perkins, S.P.** (1999). “Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek Basin in south-central Kansas”. *Journal of Hydrology* 214 (1–4), 179–196.
- Theis, C.V.** (1941). “The effect of a well on the flow of a nearby stream”. *Am. Geophys. Union Trans.* 22 (3), 734–738.
- Vélez, J. I.** (2001). “Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulación de Crecidas”. *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.