

Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija

Separation of base flow in upper part of the Lebrija river basin

Sully Gómez^{1}, Jorge Guzmán²*

¹Escuela de Ingeniería Civil. Grupo GPH. Universidad Industrial de Santander. UIS. A. A. 678. Bucaramanga, Colombia.

²Escuela de Ingeniería Civil. Grupo GPH. Universidad Industrial de Santander. UIS. A. A. 678. Bucaramanga. Colombia.

(Recibido el 13 de enero de 2011. Aceptado el 19 de noviembre de 2011)

Resumen

Para realizar la separación del flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija, se desarrollaron y aplicaron conceptos físicos como la ecuación de conservación de masa con trazadores llamados isótopos estables del agua y algoritmos numéricos basados en curva de recesión de series de tiempo de caudales. Estos algoritmos utilizan parámetros que tienen base física en la recesión de los ríos y pueden representar comportamientos no lineales en el almacenamiento de los acuíferos. Se realizaron muestreos de isótopos estables tanto en aguas lluvias, como en aguas subterráneas y en ríos, teniendo en cuenta la respuesta de las componentes del hidrograma en diversas escalas temporales y espaciales. Los análisis resultantes de la aplicación de curvas de recesión y ecuación de conservación de masa en esta cuenca, validan la existencia de sistemas de acuíferos interconectados y en contacto con el río principal. Los resultados obtenidos mediante las dos técnicas, permiten proponer un valor significativo de flujo base en la cuenca.

----- *Palabras clave:* Flujo base, isótopos estables, conservación de masa, análisis de recesión, acuíferos

Abstract

To make separation of base flow in the upper part of Lebrija River basin, we developed and applied physical concepts such as mass balance equation with natural tracers called stable isotopes of water and numerical algorithms based on stream flow recession from time series. These algorithms uses parameters

* Autor de correspondencia: teléfono +57 + 7 + 634 40 00, ext. 2455, correo electrónico: sgomez@uis.edu.co (S. Gómez)

that have physical meaning in the recession of the rivers and may represent behaviours non lineal in groundwater storage. Sampling of stable isotopes in rainwater, as in groundwater and rivers were made, taking into account the response of the components of hydrograph in several scales, seasonal and spatial. The analysis resulting from the recession parameters and equation for the mass balance equation validated the existence of aquifer systems in contact with the main river. The results obtained allow proposing a significative value for base flow in the Lebrija basin.

----- **Keywords:** Base flow, stable isotopes, mass balance equation, stream flow recession, aquifers

Introducción

La magnitud del flujo base representa el agua almacenada en los acuíferos en contacto con el río y da cuenta de un potencial de agua subterránea en la cuenca, el flujo base puede traducirse como un indicador de sostenibilidad del recurso hídrico.

La Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), tiene una población cercana a 1'300.000 habitantes, la mayoría de ellos localizados en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga, quienes se abastecen con el recurso hídrico que aporta la cuenca y es obtenido mediante la construcción de bocatomas en sus ríos principales. Actualmente se construye el embalse del Río Tona para complementar el abastecimiento. La cuenca tiene un área de 1280 km², presenta el 80% de su área en zona montañosa y el 20% en zona ondulada a plana, la zona montañosa hace parte del Macizo de Santander, posee rocas ígneas (Cuarzomonzonitas) y metamórficas, (Neis de Bucaramanga y Formación Silgará) altamente fracturadas y meteorizadas. La zona plana se encuentra conformada por depósitos aluviales, tipo abanicos, localizados sobre rocas sedimentarias de la formación Jordán y Girón principalmente [1]. Se encuentran acuíferos de pequeña a mediana extensión con productividad baja a media, algunos de ellos constituyen acuíferos colgados y se encuentran comunicados con acuíferos más profundos en los depósitos aluviales de formación Bucaramanga y en formaciones sedimentarias [2]. Estos acuíferos se encuentran en contacto con los ríos que atraviesan los depósitos. El punto de

cierre de la cuenca se localiza en el sitio llamado Café Madrid, aguas abajo de la unión del Río de Oro y Río Surata, es el sitio representativo de la interrelación entre el río y los acuíferos existentes. En la CSRL los isótopos estables del agua se han utilizado hasta el momento en identificar la localización de recarga a acuíferos [3]. En este trabajo, los isótopos estables o naturales del agua se han empleado como una novedosa técnica de separación de flujo base, la cual involucra el fenómeno físico de la mezcla de aguas nuevas y aguas antiguas, fenómeno que se representa mediante la ecuación de conservación de masa. Con el fin de obtener contenidos isotópicos de las diferentes componentes, se diseñaron y desarrollaron muestreos de aguas de lluvias, aguas subterráneas y aguas de ríos, bajo protocolos de toma de muestras, adecuados a las condiciones de la región. La CSRL es considerada como una cuenca piloto en la utilización y aplicación de los isótopos estables del agua en Sur América. Con el fin de comprobar los resultados de los conceptos anteriores y acercarse a otras interpretaciones físicas de la cuenca, como es la recesión de los acuíferos observada en el flujo base de los ríos, se aplicaron algoritmos numéricos que involucran parámetros relacionados con el fenómeno de recesión y permiten realizar la separación de flujo base a partir de series de tiempo de caudales.

Conceptualización

Se exponen los conceptos básicos para el desarrollo de las dos técnicas que se utilizan en la separación del flujo base en la Cuenca Superior del Río Lebrija,

ellos son, uso de los isótopos estables en la ecuación de conservación de masa y uso de algoritmos numéricos basados en curvas de recesión.

Isótopos estables del agua

Los isótopos son cada uno de los núcleos atómicos de un mismo elemento químico, con el mismo número atómico, pero con diferente número másico. En otras palabras, son átomos que tienen el mismo número de protones y de electrones, pero diferente número de neutrones. Algunos isótopos del agua como ^{18}O (oxígeno 18) y ^2H (Deuterio) tienen contenidos isotópicos que se preservan en algunos sistemas del ciclo hidrológico, como son los acuíferos o algunos cuerpos de agua, donde no ocurre su fraccionamiento (el fraccionamiento se da por cambio de fase). Las concentraciones de ^{18}O y ^2H del agua son expresadas mediante la diferencia en partes por mil de la relación D/H y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ respecto a las mismas relaciones en el agua del océano (SMOW, Standard Mean Ocean Water), llamada muestra patrón. Esta diferencia se expresa como un contenido cuya notación es δ [4]:

$$\delta = \frac{C_{\text{MUESTRA}} - C_{\text{SMOW}}}{C_{\text{SMOW}}} \quad (1)$$

Donde δ es el contenido isotópico, C_{MUESTRA} es la concentración de isótopos de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ para el oxígeno y D/H para el deuterio de la muestra, C_{SMOW} es la concentración de isótopos (SMOW) de la muestra patrón. Durante las diferentes etapas del ciclo hidrológico los isótopos del agua adquieren un contenido isotópico debido a los cambios de fase (evaporación y condensación), aguas evaporadas presentan mayores contenidos isotópicos y aguas de lluvia presentan menores contenidos isotópicos, por tanto se diferencian unas aguas de otras en un diagrama de ^{18}O vs ^2H , llamado Recta Meteorica o de Craig [5].

Composición isotópica del agua en ríos

La composición isotópica del agua en ríos refleja tanto los procesos físicos que han dado lugar a su origen, como la importancia de los diferentes

componentes que conforman el flujo en el río. La composición isotópica del agua del río está relacionada con el contenido isotópico de la precipitación. Esta condición es más evidente en cuencas pequeñas a medianas que en los ríos más grandes, los cuales transportan agua a lo largo de grandes distancias. Las contribuciones de las diferentes componentes del flujo, superficial, subsuperficial y subterránea, cada una con su relación isotópica característica, determinan la composición isotópica final del agua en los ríos. En cuencas donde la componente del flujo base es importante, se observa diferencia entre las señales o contenidos isotópicos de los diferentes flujos, caracterizando a cada uno de ellos diferentes tiempos de respuesta, de más rápido a más lento, respectivamente. La escorrentía y el flujo subsuperficial corresponden a aguas nuevas y el flujo subterráneo a aguas de mayor edad. La figura 1 representa el comportamiento típico de separación de un hidrograma. El uso de otros trazadores, isotópicos y químicos, permite realizar la separación en tres componentes [6].

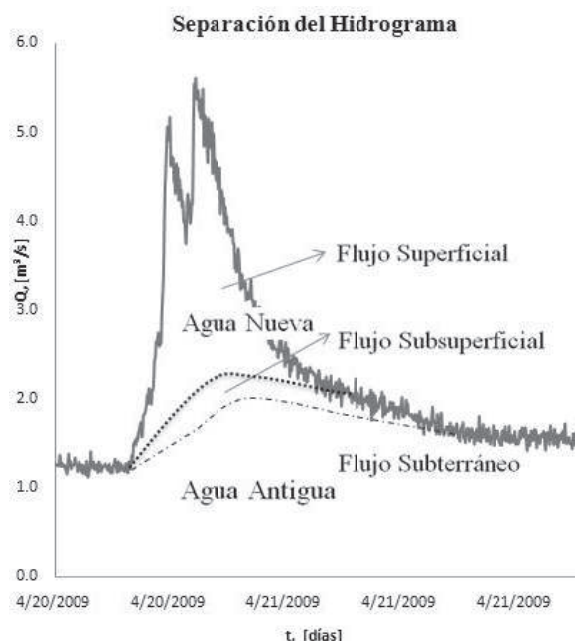


Figura 1 Esquema de separación del hidrograma

Separación de flujo base en dos componentes

El flujo de agua en el río está compuesto por el flujo base, producto de la comunicación de este con el acuífero y por el flujo superficial proveniente del agua de escorrentía producida por los eventos de lluvias que ocurren en la cuenca. La ecuación de conservación de masa tomando como volumen de control un segmento de un río, donde los caudales de entrada y salida son constantes y suponiendo que en ese tramo no hay pérdidas, permite relacionar cada una de las componentes del flujo con su correspondiente contenido isotópico, así:

$$Q_T \delta_T = Q_o \delta_o + Q_s \delta_s \quad (2)$$

Donde Q_T , Q_o , Q_s , son el flujo total en el río, flujo base y escorrentía superficial respectivamente y δ_T , δ_o , δ_s , corresponden a las contenidos isotópicos del flujo total en el río, flujo base y escorrentía superficial respectivamente, despejando Q_o en (2) se obtiene:

$$Q_o = \frac{Q_T \delta_T - Q_s \delta_s}{\delta_o} \quad (3)$$

La ecuación de flujo volumétrico, bajo la consideración de densidad constante, $Q_s = Q_T - Q_o$, se reemplaza en (3) y se obtiene:

$$Q_o = Q_T \left(\frac{\delta_T - \delta_s}{\delta_o - \delta_s} \right) \quad (4)$$

Los contenidos isotópicos requeridos en (4) requieren datos de contenidos isotópicos que sean promedios ponderados de los diferentes flujos que representan. Los muestreos se diseñan para obtener promedios significativos y representativos del contenido isotópico en las escalas temporales y espaciales, de cada una de las componentes. La ecuación (4) es utilizada para realizar la separación de flujo base en dos componentes, esta ecuación representa la

proporción del flujo base respecto al flujo total que transcurre por el río, en función de los contenidos isotópicos de las aguas de escorrentía superficial, flujo base y flujo total. La estimación de los valores anteriores involucra la medición de variables como la precipitación y el caudal en escalas temporales y espaciales adecuadas.

Contenido isotópico de la escorrentía superficial

La escorrentía superficial se produce como respuesta a los eventos de lluvias en escalas temporales horarias a mensual y se encuentra directamente relacionada con la precipitación. La escorrentía superficial estará representada por los contenidos isotópicos de la precipitación. Estos contenidos presentan variación estacional que puede ser identificada en muestreos continuos a lo largo del año. Las muestras de precipitación se colectan durante un periodo representativo y se obtiene un promedio ponderado de los contenidos isotópicos [7] sugiere la siguiente expresión:

$$\delta = \sum_{i=1}^n P_i \delta_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

Donde P_i es el valor de la precipitación y δ_i es el contenido isotópico de la muestra tomada durante el intervalo de tiempo de un mes. El valor del contenido isotópico δ se distribuye espacialmente y se obtiene un valor promedio representativo en el área de estudio.

Contenido isotópico del flujo base

El flujo base es aportado por el agua de los acuíferos en contacto con el río, el agua subterránea proviene de zonas alejadas o cercanas al río, por lo tanto su señal isotópica expresa fenómenos agregados de aguas que circulan en diversos sistemas hidrogeológicos, su respuesta es más lenta y su contenido isotópico presenta menor variación temporal. Las concentraciones isotópicas del flujo base se obtienen tomando

muestras del agua del río en épocas de estiaje y en pozos de aguas subterráneas, localizados en acuíferos en contacto con el río. Se necesitan suficientes puntos para obtener un valor promedio espacial representativo del contenido isotópico del flujo base. El contenido isotópico del flujo base representa la composición isotópica del agua más antigua en la cuenca.

Contenido isotópico del flujo en ríos

La concentración isotópica del flujo en el río puede cambiar significativamente durante la ocurrencia de eventos (niveles altos y niveles bajos), por lo tanto se debe realizar muestreos en forma continua, que tomen estos eventos durante algunos años y así obtener un promedio representativo del contenido isotópico del flujo en el río. El contenido isotópico promedio del flujo total en el río, se obtiene mediante la expresión propuesta por [4].

$$\delta_T = \frac{\sum \delta_i \cdot Q_i}{\sum Q_i} \quad (6)$$

Donde δ_T representa el contenido isotópico promedio del flujo total en el río, δ_i representa el contenido isotópico de la muestra correspondiente al tiempo en que se presenta el caudal seleccionado y Q_i el caudal correspondiente al periodo de tiempo escogido (diario o semanal). Para poder operar los valores anteriores entre sí, es necesario tener simultáneamente datos de caudales y de contenidos isotópicos.

Algoritmos numéricos basados en curva de recesión

Los métodos llamados de algoritmos o filtros digitales, se utilizan en la separación de flujo base cuando se tienen registros históricos de caudales. Estos fueron creados para reproducir a partir de hidrogramas, señales de alta frecuencia (respuesta de flujo superficial) y señales de baja frecuencia (respuesta del flujo base) en forma repetitiva. Los primeros autores en sugerir el uso

de un filtro digital para hacer separación de flujo base [8], proponen un simple promedio entre el escurrimiento directo y el flujo base en el intervalo de tiempo anterior. Aunque esta técnica no fue desarrollada con una base física, algunos autores [9] han propuesto filtros que incluyen conceptos físicos a partir de la forma simple exponencial de agotamiento de los acuíferos que están en contacto con el río, llamada curva de recesión, esta forma expresa el resultado de un almacenamiento lineal. Otros autores [10] plantean un filtro que propone una ecuación de conservación de masa en laderas, en este caso las componentes, flujo superficial, evapotranspiración y recarga de agua subterránea son iguales a la precipitación sobre la ladera, por tanto los coeficientes que acompañan a estas componentes son iguales a uno. La ecuación es luego proyectada a la cuenca y obtienen el filtro, el cual fue probado en pequeñas cuencas. Los coeficientes involucrados en el filtro presentan problemas con la variación espacial de la lluvia. Algunas de las ecuaciones que se presentan a continuación y que son aplicadas en la cuenca de estudio, consideran efectos de no linealidad en la recesión del hidrograma, lo cual parece interpretar mejor las condiciones físicas de la interrelación entre los acuíferos y el río.

Algoritmo de un parámetro

En [11] el autor considera que el filtro utilizado por Lyne y Hollick presenta flujo base constante cuando no hay escurrimiento y propone una reformulación que se expresa como:

$$Q_{b(i)} = kQ_{b(i-1)} + (1-k)Q_{d(i)} \quad (7)$$

Donde $Q_{b(i)}$ y $Q_{d(i)}$ representan el flujo base y la escurrimiento directa respectivamente, en el intervalo de tiempo i , y el parámetro k es la llamada constante de recesión durante el periodo donde no se presenta escurrimiento directa. Como el flujo total del río Q es la suma del flujo base Q_b y escurrimiento directa Q_d , entonces se tiene:

$$Q_{b(i)} = \frac{k}{2-k} Q_{b(i-1)} + \frac{1-k}{2-k} Q_i \quad (8)$$

Condicionada por:

$$Q_b(i) \leq Q(i) \quad (9)$$

Algoritmo de dos parámetros

Posteriormente [12] desarrolla un modelo que tiene mayor flexibilidad al introducir un segundo parámetro C , el cual reemplaza a $(1-k)$ en (8), aunque la determinación de este parámetro C es determinado cambiando su valor hasta que el modelo se ajuste con el hidrograma en la parte final del escurrimiento directo. La ecuación (10) está sujeta a (9).

$$Q_{b_i} = \frac{k}{1+C} Q_{b_{i-1}} + \frac{C}{1+C} Q_i \quad (10)$$

Algoritmo de tres parámetros

Este algoritmo corresponde a la forma generalmente elegida del modelo lineal de IHACRES [13], considerado como un modelo lluvia escurrimiento, se basa en que el exceso de lluvia μ es dividido en componentes lento y rápido, nombrados Q_b y Q_d

$$Q_{b(i)} = \beta_s \mu_{(i)} - \alpha_s Q_{b(i-1)} \quad (11)$$

$$Q_{d(i)} = \beta_q \mu_{(i)} - \alpha_q Q_{d(i-1)}$$

Donde los α y β son parámetros y los sufijos q y s se refieren al flujo rápido y lento respectivamente, cabe notar que las α son negativas. Eliminado el exceso de lluvia μ de estas ecuaciones, y expresado la escurrimiento directa como la diferencia entre el flujo base Q_b y la descarga total del río Q_d , da como resultado la siguiente ecuación de flujo base:

$$Q_b(i) = -\frac{\alpha_s \beta_q + \alpha_q \beta_s}{\beta_q + \beta_s} Q_b(i-1) + \frac{\beta_s}{\beta_q + \beta_s} [Q(i) + \alpha_q Q(i-1)] \quad (12)$$

En esta ecuación Q corresponde al flujo modelado en lugar del flujo observado.

$$C = \frac{\beta_s}{\beta_q} \quad k = -\alpha_s - \alpha_q \frac{\beta_s}{\beta_q}$$

Se reemplazan en la ecuación anterior y se obtiene:

$$Q_b(i) = \frac{K}{1+C} Q_b(i-1) + \frac{C}{1+C} (Q(i) + \alpha_q Q(i-1)) \quad (13)$$

Algoritmo de Smakhtin

La diferencia principal entre este algoritmo [14] y los tres anteriores es que se halla la componente de escurrimiento directa y se obtiene el flujo base como la diferencia del caudal total del río y el valor de escurrimiento obtenido.

$$q_i = \alpha \cdot q_{i-1} + \beta(1+\alpha)(Q_i - Q_{i-1}) \quad (14)$$

$$Q_{B_i} = Q_i - q_i \quad (15)$$

Donde:

- Q_i = Flujo Total
- q_i = Escurrimiento Directa Calculada
- Q_{B_i} = Flujo Base Calculado
- i = Intervalo de Tiempo
- α, β = Parametros de Separacion
($0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 0.50$)

La componente de flujo base (Q_{B_i}) nunca debe ser menor que cero, ni mayor que el flujo total (Q_i). La cantidad de flujo base resulta de un valor específico del parámetro α que es muy dependiente de la forma de las variaciones naturales del hidrograma.

Diseño de sistemas de muestreos y metodología

La determinación de los sitios de muestreo, la frecuencia y el tiempo de duración de ellos, obedecieron a las escalas temporales en las que se suceden las diferentes componentes del flujo en el río. La localización de los sitios obedeció al conocimiento que se tiene de los sistemas hidrogeológicos de la cuenca [2,14], conocimiento hidrológico de la cuenca y a la existencia de estaciones de medición de caudales y precipitación.

Muestreo de las aguas de escorrentía superficial

Se construyó un sistema de recolectores de aguas lluvias para conocer sus contenidos isotópicos. El diseño de la red tuvo en cuenta identificar el efecto de altitud del fraccionamiento isotópico en la cuenca y su comportamiento estacional. Se localizaron once muestreadores distribuidos cada 200 a 400 metros de diferencia de altura sobre el área representativa de la zona montañosa y de la zona ondulada de la cuenca. La mayoría de los recolectores se localizaron junto a un pluviómetro [15]. La muestra del agua lluvia, llamada muestra integrada, es recolectada a lo largo del mes. El muestreo de isótopos de la precipitación se realizó entre octubre del 2004 y febrero del 2007. Se aplicó (5) con los datos de precipitación mensual medidos en pluviómetros para obtener el contenido isotópico de la escorrentía superficial. Se considera que la zona montañosa representa la escorrentía superficial representativa de la cuenca y es en esta zona donde se distribuye la precipitación y contenidos isotópicos.

Muestreo de las aguas de flujo base

Sobre la parte baja de la CSRL, conformada por formaciones aluviales y sedimentarias, están ubicados los principales centros urbanos; en esta zona se encuentran localizados los acuíferos reconocidos de la región de Bucaramanga. La toma de muestras de aguas subterráneas se realizó en piezómetros, afloramientos de agua y pozos de bombeo, localizados en los acuíferos conformados

por roca sedimentaria y formaciones aluviales de la cuenca, realizados por [3,7]. Se incluyeron nuevas muestras para corroborar la poca variación temporal del contenido isotópico de las aguas subterráneas. Finalmente se incluyeron datos de muestras en ríos a lo largo de la cuenca en la época de estiaje del año 2007 para incluir valores de posibles acuíferos en rocas fracturadas. En total se cuenta con datos de muestras tomadas en (40) cuarenta puntos localizados principalmente en la zona aluvial entre alturas 620 y 1500 msnm, los cuales representan los contenidos isotópicos de las aguas subterráneas provenientes tanto de los principales acuíferos, como del flujo base de los principales ríos.

Muestreo de las aguas del flujo en el río

El punto de cierre de la cuenca se encuentra localizado en el sitio llamado Café Madrid, aguas abajo de la unión de los ríos Oro y Surata en una altura aproximada de 620 msnm, es considerado el sitio más significativo para realizar la separación del flujo base en la cuenca. En este sitio se cuenta con una estación de medición continua de caudales operada por el IDEAM. El muestreo de aguas en ríos se realizó durante tres años, mediante protocolos de muestreo propuestos para las condiciones de la región, por [16,17]. Se tomaron muestras diarias desde enero del 2005 hasta diciembre de 2007.

Resultados de separación de flujo base en la CSRL

Los conceptos presentados en el numeral anterior permitieron obtener resultados de separación de flujo base, tanto con la aplicación de la ecuación de conservación de masa, como de algoritmos numéricos basados en curvas de recesión.

Resultados obtenidos mediante el uso de isótopos estables del agua

La distribución espacial de la precipitación y contenidos isotópicos se realizó utilizando interpolación espacial kriging y variogramas de

mejor ajuste desarrollado en [18] con el fin de observar relaciones espaciales y obtener valores promedios de contenidos isotópicos en áreas representativas de la cuenca. En este trabajo se discuten en detalle los resultados obtenidos con el trazador oxígeno 18.

Contenido isotópico promedio de la escorrentía superficial

Se analizó el comportamiento estacional de los contenidos isotópicos de las lluvias, los cuales se encuentran relacionados con el valor medido de la precipitación en cada mes (efecto de cantidad). La precipitación presenta un patrón de comportamiento isotópico para cada época del año, dos épocas secas con los mayores contenidos isotópicos y dos épocas lluviosas con menores contenidos isotópicos. Este comportamiento es acorde con la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical en la cuenca. La distribución espacial de los valores de precipitación y de contenidos isotópicos de cada una de las épocas de lluvia, se realizó con el variograma de Gauss y se obtuvo la distribución observada en la figura 2 para una época lluviosa.

El promedio de contenido isotópico de la escorrentía superficial se obtiene mediante la aplicación de (5). El trazador $\delta^{18}\text{O}$ (Oxígeno 18) presenta un valor de -10,85. Los valores de contenido isotópico de las aguas de lluvias presentan valores menores (aguas empobrecidas) respecto a las demás aguas muestreadas.

Contenido isotópico del flujo base

Los contenidos isotópicos de cada punto del muestreo de flujo base se distribuyen espacialmente en el área donde se encuentran localizados los principales acuíferos de la cuenca. Esta área corresponde a la zona llamada aluvial y sedimentaria, localizada en la cuenca entre los 620 msnm y los 1500 msnm aproximadamente. Los variogramas que mejor representan estos datos toman la forma potencial y exponencial, los cuales mediante la aplicación del método de interpolación kriging permiten obtener los promedios de contenidos isotópicos observados en (tabla 1).

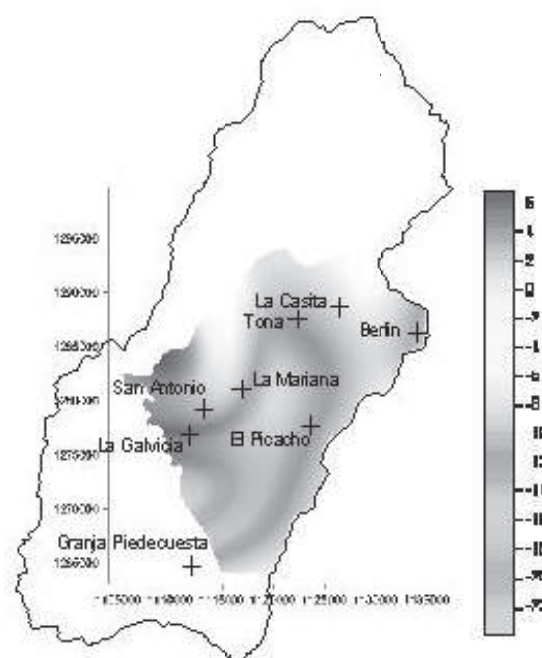


Figura 2 Distribución espacial de Oxígeno 18

Tabla 1 Contenidos isotópicos de flujo base

Contenido Isotópico del flujo base	
Variograma	$\delta^{18}\text{O}$
Potencial	-8,50
Exponencial	-8,53

Los mapas de distribución de contenidos isotópicos del flujo base, figura 3, permiten identificar aguas subterráneas que pueden ser agrupadas en tres rangos. Contenidos isotópicos mayores (Oxígeno 18, entre -7 y -8) corresponden a acuíferos superficiales o acuíferos colgados, contenidos isotópicos medios (Oxígeno 18, varía entre -8 y -9) corresponden a acuíferos intermedios y valores menores (Oxígeno 18 entre -9 y -10) pueden corresponder a los acuíferos de mayor profundidad y directamente en contacto con el río. El comportamiento observado en la distribución espacial de los contenidos isotópicos coincide aproximadamente con la localización del acuífero superficial de Bucaramanga y con acuíferos más profundos.

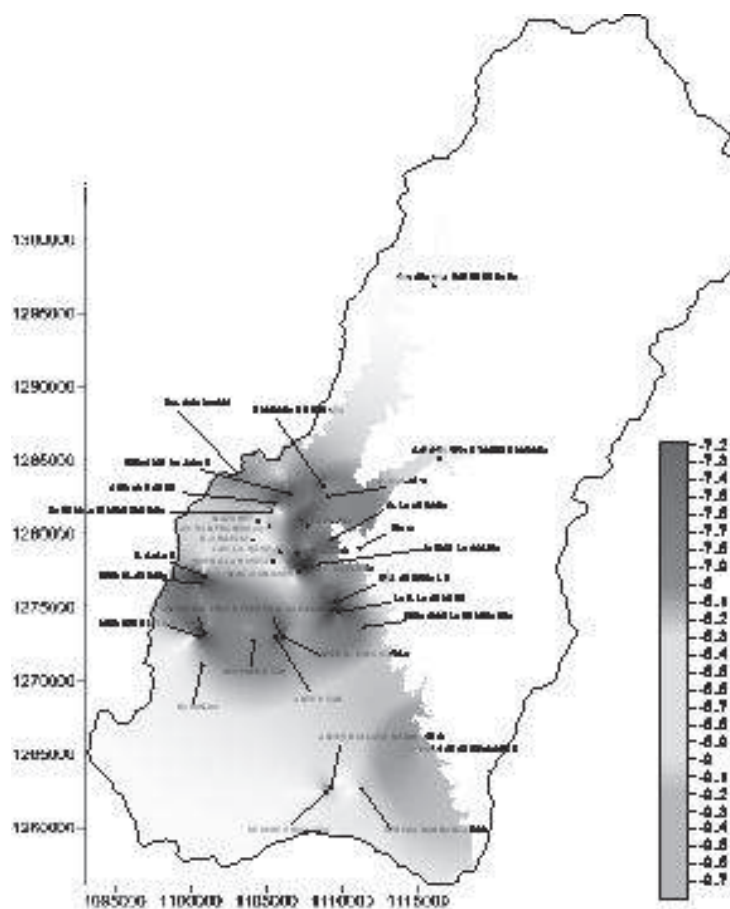


Figura 3 Distribución espacial de Oxígeno 18 del agua subterránea

Contenido isotópico promedio del flujo total en el río

Los contenidos isotópicos del agua en el río, son obtenidos en muestras recolectadas en un único punto, en este caso, el punto de cierre de la cuenca. Los datos de contenidos isotópicos y caudales recolectados entre 2005 y 2007 son aplicados en (6) para obtener los contenidos isotópicos promedios del flujo total en el río: $\delta^{18}\text{O}$ (Oxígeno 18) igual a -9,2.

Resultado de separación de flujo base mediante el uso de isótopos estables

Con los valores obtenidos de los contenidos isotópicos de la escorrentía superficial, del flujo base y del flujo total en ríos, se aplicó (4) y se obtuvo una fracción de 71,2% de flujo base respecto al flujo total medido en el río. La toma de datos de isótopos estables, los procedimientos utilizados y las condiciones de la cuenca, permitieron encontrar contraste ente las señales de los contenidos isotópicos de las distintas componentes del hidrograma, aguas nuevas y aguas antiguas. En la tabla 2 se muestran los valores de contenidos isotópicos promedios de las aguas muestreadas en la cuenca.

Resultados obtenidos mediante el uso de algoritmos numéricos

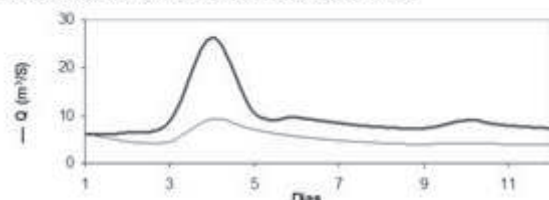
Los cuatro algoritmos de separación de flujo base revisados en el numeral 2.2 fueron aplicados a la serie histórica de caudales diarios en la estación Café Madrid (punto de cierre de la cuenca). Antes de realizar la separación de flujo base se obtuvo la constante de recesión k

del río mediante la curva maestra de recesión [15,18]. Con este valor se realizó el ajuste para hallar los demás parámetros involucrados en los modelos. Los algoritmos utilizados se aplican y se ajustan hasta que la separación en la curva de recesión se aproxime al hidrograma. La primera aproximación al hidrograma se realizó con un periodo de 12 días buscando el mejor ajuste. (Ver figura 4).

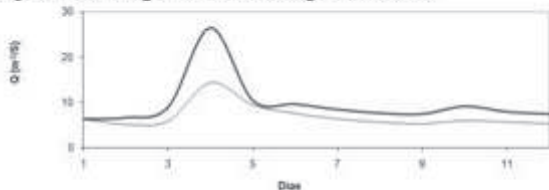
Tabla 2 Contenidos isotópicos encontrados en las aguas muestreadas de la cuenca

Tipo de aguas muestreadas	Componente representada	Contenido isotópico ^{18}O
Aguas lluvias	Flujo Superficial	-10,85
Aguas subterráneas	Flujo base	-8,50
Aguas en ríos	Flujo total	-9,2

Ajuste con algoritmo de un parámetro



Ajuste con algoritmo de dos parámetros



Ajuste con algoritmo de tres parámetros

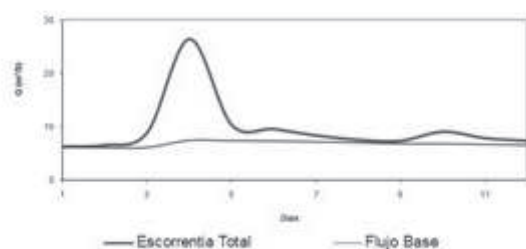


Figura 4 Ajuste con uno, dos y tres parámetros

En la figura 4 se observa mayor aproximación con el algoritmo de tres parámetros. En la figura 5 se observa las curvas de separación, obtenidas durante un periodo de 100 días.

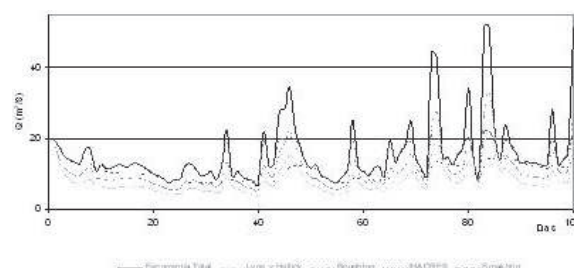


Figura 5 Resultados de algoritmos de separación

Se observó que los valores hallados de los parámetros son iguales en diferentes escalas de tiempo, excepto para el algoritmo de Smakhtin [14,11] ya que sus parámetros varían dependiendo de la resolución temporal. Finalmente se aplicaron los cuatro filtros o algoritmos utilizando la serie de tiempo de caudales diarios de la estación Café Madrid entre los años 1970 y 2000 para obtener la estimación final del flujo base, los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Resultados de algoritmos

<i>Algoritmo</i>	<i>%Flujo base</i>
Un parámetro	50
Dos parámetros	69
Tres parámetros	71
Smakhtin	72

Se considera que el filtro que mejor representa las condiciones de la cuenca es el modelo de tres parámetros por ajustarse mejor a los hidrogramas. Con este modelo se obtuvo el flujo base igual a 71% del flujo total medido en la estación de Café Madrid. Este algoritmo representa efectos de almacenamiento no lineal de los acuíferos. El algoritmo de Smakhtin parece no representar adecuadamente el flujo base en series de tiempo largas. El algoritmo de un parámetro presenta un valor de 50% alejado de los demás valores, debido posiblemente a que este modelo considera un comportamiento lineal de la curva de recesión y la cuenca presenta acuíferos superficiales, medios y profundos, comunicados entre sí, difícilmente representados con este modelo. Se conocen niveles de agua de acuíferos localizados en cotas 1020 msnm, 820 msnm, 650 msnm hasta la cota del punto de cierre de la cuenca, 620 msnm. Los acuíferos localizados en cotas mayores se desconocen, pero deben existir.

Conclusiones

En la Cuenca Superior del Río Lebrija se evaluaron valores de flujo base aplicando la ecuación de conservación de masa con trazadores llamados isótopos estables del agua. Los datos fueron obtenidos a partir sistemas recolectores de muestras y campañas diseñadas especialmente para identificar los valores promedios de contenidos isotópicos de las principales componentes del hidrograma en escalas espaciales y temporales, adecuadas. El resultado obtenido en el punto de cierre de la cuenca mediante la técnica de isótopos y la discusión presentada en este trabajo es del 71% de la escurriencia total.

El muestreo de isótopos realizado en aguas subterráneas y agua de ríos en época de estiaje, mostró que los valores obtenidos de contenidos isotópicos, permiten diferenciar aguas subterráneas con valores que caracterizan acuíferos superficiales, acuíferos intermedios y acuíferos profundos intercomunicados. Por lo tanto, el flujo base en la cuenca se encuentra asociado a sistemas interconectados de acuíferos locales y regionales.

La aplicación de algoritmos numéricos a serie de caudales diarios de treinta años en la estación Café Madrid, punto de cierre de la cuenca, permitió observar que el algoritmo de un parámetro no representa las condiciones de la cuenca. Los demás algoritmos funcionan bien y muestran resultados semejantes entre sí. Los valores de flujo base obtenidos mediante estos métodos son perfectamente comparables con el valor obtenido por la ecuación de conservación de masa. El valor que se propone como representativo de la Cuenca Superior del Río Lebrija es del 70%. Este valor es significativo y puede ser interpretado como un indicador de sostenibilidad en la cuenca, en relación con la cantidad del recurso hídrico.

Los algoritmos basados en curvas de recesión, que mejor interpretan el flujo base en la cuenca son los que incluyen más de dos parámetros. Estos podrían representar las condiciones complejas que caracterizan acuíferos en diversas escalas intercomunicados entre sí, los cuales a su vez pueden ser recargados desde otras cuencas, estar en contacto con el río o aportar flujo hacia otras cuencas. En la cuenca el recurso hídrico debe ser preservado en cantidad y la sostenibilidad debe ser estudiada también en función de la calidad para que se logre el desarrollo sostenible de la región. El desarrollo de alternativas de abastecimiento de agua en la región debe direccionarse hacia uso de agua subterránea de acuerdo con los resultados de este trabajo.

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimientos a la Agencia Internacional de Energía Atómica

(IAEA) por su colaboración con el desarrollo de este trabajo.

Referencias

1. D. Ward, R. Goldsmith. "Geología de los Cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander". *Boletín Geológico*. Vol. XXI No. 1-3. 1973. pp.47-69.
2. S. Gómez, J. Colegial. *Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el macizo de Santander e identificación de acuíferos*. Informe de Investigación UIS-Colciencias. 2003. pp.45-58.
3. S. Gómez, A. Anaya. "Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga." *Revista Avances en Recursos Hidráulicos*. No.11. 2004. pp. 37-50.
4. UNESCO-IAEA. "Environmental isotopes in the hydrological cycle." *Principles and applications IHP-V Technical Documents in Hydrology*. No. 39. 2001. pp. 35-52.
5. H. Craig. "Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters." *Sciences*. Vol. 133. 1961. pp. 1833- 1834.
6. I. Clark, P. Fritz. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Ed. Lewis. New York (USA). 1997. pp.99-102.
7. J. J. McDonnell, M. bonnell, J. K. Stewart, A. J. Pearce. "Deuterium Variations in Store Rainfall: Implications for Stream Hydrograph Separation." *Water Res. Resear.* Vol. 26 No. 3. 1990. pp. 455-458.
8. V. D. Lyne, M. Hollick. *Stochastic Time-variable Rainfall-runoff Modeling in Hydrol. and Water ResourSymp.* Institution of Engineers Australia. 1979. pp. 89-92.
9. T. G. Chapman. "A comparison of algorithms for stream flow recession and base flow separation". *Hydrological Processes*. Vol. 13. 1999. pp.701-714.
10. P. Furey, V. K. Gupta. "A physically based filter for separating base flow from stream flow time series". *WRR*. Vol. 37. No. 1. 2001. pp. 2709-2722.
11. T. G. Chapman, R. J. Nathan, T. A. MacMahon. "Evaluation of automated Techniques for base flow and recession analyses". *Water Resour Research*. Vol. 27. 1991. pp. 1783-1784.
12. W. C. Boughton. *A Hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments*. Hydrol. and Water Resour. Symp., Institution of Engineers Australia. Newcastle. 1993. pp. 317-324.
13. A. J. Jakeman, G. M. Hornberger. *How much complexity is warranted in rainfall-runoff facility*. Hydrol Paper 25. Colorado State University Fort Collins. 1993. pp. 243-248.
14. V. Smakhtin. "Low flow hydrology: a review". *Journal of hydrology*. Vol. 240. 2001. pp. 147-186.
15. S. Gómez, D. Guzmán, H. Camacho. *Red de Muestreadores de Isótopos Estables de la Precipitación en la CSRL*. Memorias II Congreso Colombiano de hidrogeología. Bucaramanga. Colombia. 2006. pp.65-72.
16. J. Maldonado, W. Velasco. *Implementación de una metodología para el muestreo de isótopos estables y aplicación a la separación de flujo base*. Proyecto de Grado. UIS. 2005. pp. 28-69
17. J. Guzmán, G. Balaguera, A. Serrano. *Separación de Flujo Base en la CSRL en Estación Café Madrid*. Memorias II Congreso Colombiano de hidrogeología. Bucaramanga, Colombia. 2006. pp.73-80.
18. J. J. Vásquez, L. Arroyave. *Técnica de Kriging para espacializar isótopos estables en la Cuenca Superior del Río Lebrija*. Proyecto de Grado. UIS. 2009. pp.52-78.