

**SEPARACIÓN DE FLUJO BASE EN LA CUENCA DEL RÍO DE ORO EN LA
ESTACIÓN CONQUISTADOR ALTO MEDIANTE LA PROGRAMACIÓN DE
ALGORITMOS DE NO LINEALIDAD**

**DERLY ESTEFANNY GÓMEZ GARCÍA
LUZ ADRIANA GÓMEZ MOGOLLÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

2012

**SEPARACIÓN DE FLUJO BASE EN LA CUENCA DEL RÍO DE ORO EN LA
ESTACIÓN EL CONQUISTADOR ALTO MEDIANTE LA PROGRAMACIÓN DE
ALGORITMOS DE NO LINEALIDAD**

**DERLY ESTEFANNY GÓMEZ GARCÍA
LUZ ADRIANA GÓMEZ MOGOLLÓN**

Trabajo de grado modalidad Investigativa

Para optar al título de:

Ingeniero Civil

Director:

SULLY GÓMEZ ISIDRO

Ingeniero Civil, M. Sc., Ph. D.

CoDirector:

ADRIANA SERRANO SANTIAGO

Ingeniero Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

2012

Todo mi trabajo, cada paso que doy, cada minuto de mi vida, es sólo por Él y para Él... para Dios quién es la luz en mi camino y el centro de mi mundo.

A mis amados padres Angela y Carlos que siempre han estado dispuestos a darlo todo por mi. Quienes han estado conmigo apoyándome incondicionalmente.

A mis abuelos Ana y José mis segundos padres y uno de los regalos más maravillosos de Dios. A ellos que amo con todo mi ser.

A una de mis personas favoritas en el universo, Julián quién es mi orgullo y motivo para mejorar a diario.

A Adriana, Andrés, Daisy, Vanessa, Zaira, Geisy y demás amigos a los que agradezco por tantos momentos llenos de alegría y aprendizaje a lo largo de mi carrera.

A mi querido Christian quién me brindó su apoyo incondicional.

Derly Gómez

A Dios por que me ha permitido
vivir cada día y por todas las bendiciones que me ha brindado.

A mi padre Agustín Gómez por su apoyo y especialmente por el gran esfuerzo que
ha realizado para que pudiera salir adelante y alcanzar este logro.

A mis hermanos Diana y Andrés por su compañía y apoyo.

A mis amigos y compañeros que durante estos 5 años, estuvieron presentes en
cada paso que di, con quienes reí, lloré, aprendí y sobre todo logué crecer
personal y profesionalmente.

Especialmente a mi compañera y amiga Derly, por aguantarme, apoyarme y
ayudarme tantas veces, y a mi querido amigo Andrés por estar ahí siempre, por
compartir conmigo y enseñarme tantas cosas.

Adriana Gómez

AGRADECIMIENTOS

A nuestra directora la doctora Sully Gómez Isidro, quien con sus aportes y colaboración hizo de este un excelente proyecto.

Especialmente a nuestra co-directora la Ing. Civil Adriana Serrano Santiago, por su colaboración, confianza y apoyo a lo largo de todo el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Civil, por brindarnos la oportunidad de formarnos como ingenieras Civiles.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS.....	19
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1 HIDROGRAMA	20
1.1.1 Escorrentía superficial.....	21
1.1.2 Flujo Subsuperficial	21
1.1.3 Flujo Base.	21
1.2 CURVA DE RECESIÓN	22
1.3 METODOLOGÍAS DE SEPARACIÓN	24
1.3.1 Métodos gráficos.	24
1.3.2 Métodos químicos.	24
1.3.3 Métodos de algoritmos.	25
2. METODOLOGÍA.....	29
2.1 ZONA DE ESTUDIO.....	29
2.2 ANÁLISIS DE ÉPOCAS DE RECESIÓN	29
2.3 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA MAESTRA DE RECESIÓN (CMR)	30
2.4 ANÁLISIS DE LA CONSTANTE DE RECESIÓN.....	31
2.5 ESTIMACIÓN CAUDALES EN ÉPOCA DE NO LLUVIA	33
3. APLICACIÓN DE ALGORITMOS DE SEPARACIÓN	35
3.1 USO DEL PROGRAMA “ALGORITMOS DE SEPARACIÓN G2”	35
3.1.1 Entrada de datos.	35
3.1.2 Calibración de algoritmos.	36
3.1.3 Aplicación del programa G2 en la Estación Café Madrid.	37

3.2 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ALGORITMOS DE SEPARACIÓN EN LA ESTACIÓN CONQUISTADOR ALTO	37
3.2.1 Algoritmo de un parámetro.	38
3.2.2 Algoritmo de dos parámetros de Boughton.	38
3.2.3 Algoritmo de tres parámetros, método de IHACRES.....	40
3.2.4 Algoritmo de Nathan & McMahon.....	43
3.2.5 Algoritmo de Smakhtin & Watkins.	43
3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
4. CONCLUSIONES.....	47
5. RECOMENDACIONES	50
6. BIBLIOGRAFÍA	51
ANEXOS.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Hidrograma y sus componentes.....	20
Figura 2.	Esquema de la sección transversal a) comportamiento lineal b) comportamiento no lineal.....	23
Figura 3.	Curva Maestra de Recesión.....	31
Figura 4.	Forma no lineal de la CMR.....	33
Figura 5.	Separación del hidrograma mediante algoritmo de un parámetro	39
Figura 6.	Separación del hidrograma usando algoritmo de dos parámetros	41
Figura 7.	Separación del hidrograma usando algoritmo de tres parámetros	42
Figura 8.	Separación de flujo base con el algoritmo de Nathan & McMahon	44
Figura 9.	Separación de flujo base con el algoritmo de Smakhtin & Watkins	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Épocas de recesión.....	30
Tabla 2.	Constantes de recesión.....	31
Tabla 3.	Estructura archivo de entrada de datos.....	36
Tabla 4.	Comparación de porcentajes de flujo base BFS y G2.....	37

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Interfaz gráfica “Algoritmos de Separación G2”	54
----------	--	----

RESUMEN

TITULO:

SEPARACIÓN DE FLUJO BASE EN LA CUENCA DEL RÍO DE ORO EN LA ESTACIÓN EL CONQUISTADOR ALTO MEDIANTE LA PROGRAMACIÓN DE ALGORITMOS DE NO LINEALIDAD

AUTORES:

GÓMEZ GARCÍA, Derly Estefanny
GÓMEZ MOGOLLÓN, Luz Adriana**

PALABRAS CLAVES:

CUENCA DEL RÍO DE ORO, RECESIÓN, SEPARACIÓN DE FLUJO BASE, ALGORITMOS, NO LINEALIDAD.

DESCRIPCIÓN:

El flujo base en ríos es aportado por los acuíferos en contacto y es el que mantiene el flujo durante épocas de verano, por tal razón, es importante estudiar y conocer el comportamiento del flujo en el río en épocas secas, mediante el análisis de la curva de recesión.

El presente estudio muestra para la estación automática Conquistador Alto ubicada en la cuenca Alta del Río de Oro, que cubre un área de aproximadamente 80 km², el análisis de recesión aplicado a caudales desde octubre del 2008 hasta marzo del 2011, mediante la construcción de la curva maestra de recesión que aunque tradicionalmente se interpreta matemáticamente como una función exponencial decreciente de tipo lineal, en las cuencas montañosas, que tienen acuíferos en rocas fracturadas, por lo general, no presentan este tipo de comportamiento, siendo este último caso el de la cuenca en estudio.

Por tanto, en este trabajo se desarrolló un programa en Matlab, que permite separar el flujo base de un río utilizando algoritmos numéricos, mediante el ajuste de los diferentes coeficientes de estas ecuaciones, permitiendo al usuario identificar e interpretar la no linealidad del flujo entre el río y el acuífero, y a su vez, conocer cual es la parte del flujo del río que es aportada por los acuíferos y cual se convierte en escorrentía directa.

Finalmente, se analizaron cinco algoritmos, de los cuales dos son no lineales y tres lineales, planteados por Tom Chapman (1999), Nathan & McMahon (1990) y Smakhtin (2001). Obteniendo un buen ajuste de los datos con los algoritmos no lineales, de dos parámetros de Boughton (1993) y tres parámetros, modelo de IHACRES (1993); para el primero se obtuvo un 72%, mientras que para el de tres parámetros un 81% de caudal base siendo el que mejor representó las características de la cuenca.

*Trabajo de Investigación.

**Faculta de Ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Sully Gómez Isidro.

ABSTRACT

TITLE:

BASEFLOW SEPARATION IN THE GOLD RIVER BASIN IN THE STATION "CONQUISTADOR ALTO" BY MEANS OF THE PROGRAMMING OF ALGORITHMS OF NONLINEARITY

AUTHORS:

GÓMEZ GARCÍA, Derly Estefanny
GÓMEZ MOGOLLÓN, Luz Adriana**

KEYWORDS:

Gold River Basin, Recession, Base flow Separation, Algorithms, Nonlinearity.

DESCRIPTION:

The base flow on rivers it is contributed by the aquifers in contact and it is the one that maintains the flow during summer times, for such a reason, it is important studying and knowing the behavior of the flow in the river in dry times, through the analysis of the recession curve.

The present study shows results for the automatic station "Conquistador Alto" located in the upper part of Gold River basin that covers an area of approximately 80 km², the recession analysis was applied to flows from October 2008 until March 2011, by means of the construction of the master recession curve, although traditionally it is interpreted mathematically like a falling exponential function of lineal type, in the mountainous basins that have aquifer in fractured rocks, in general, they don't present this kind of behavior, being this the last, the case of the basin in our study.

Whereby, in this work a program was developed in Matlab, allowing separate the base flow of a river using numeric algorithms, through the adjustment of the different coefficients of these equations, allowing the user identifying and interpreting the nonlinearity of the flow between the river and the aquifer, and in turn, to know which is the part of the flow of the river that is contributed by the aquifers and which becomes in direct runoff.

Finally, five algorithms were analyzed, which two are lineal and three non-lineal, proposed by Tom Chapman (1999), Nathan & McMahon (1990) and Smakhtin (2001). throwing a good adjustment of the data with the non -lineal algorithms, two parameters of Boughton (1993) and three parameters, model of IHACRES (1993);the first one got 72% , while for that of three parameters 81% of baseflow being this the one that better it represented the characteristics of the basin.

*Project.

**Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Sully Gómez Isidro, Codirector: Adriana Serrano.

INTRODUCCIÓN

El flujo base de un río es aquel que mantiene el caudal del mismo en épocas extensas de no lluvia (verano). Identificar a partir de hidrogramas, cual parte del flujo del río es aportado por los acuíferos en contacto y cual parte se convierte en escorrentía ha sido un tema de interés clásico en la Ingeniería. Sin embargo es importante conocer el comportamiento de las curvas de recesión del río; porque además que están relacionadas con las características físicas de las formaciones geológicas en contacto con el río, es posible predecir caudales mínimos o de estiaje fundamentales para la obtención de caudales seguros en acueductos. Este tema es importante en países, que como Colombia, se ven afectados tanto por la complejidad hidrogeológica, como por los fenómenos climáticos de gran escala.

Generalmente la curva de recesión utilizada es aquella que representa el agotamiento de un embalse lineal, sin embargo la experiencia investigativa de algunos autores ha demostrado que esta forma lineal difícilmente se adapta a condiciones hidrogeológicas complejas, por lo tanto se debe estudiar la no linealidad del agotamiento de los acuíferos en contacto con el río y buscar métodos que representen mejor el fenómeno de recesión y la separación del flujo base.

Para realizar este trabajo se ha seleccionado la cuenca alta del Río de Oro, donde el comportamiento del agua subterránea se ve afectado por factores como la heterogeneidad del suelo, la presencia de diversas formaciones geológicas y morfologías de alta pendiente (Forero, 2011). Estas características se pueden comprobar al estudiar la curva maestra de recesión (CMR), gráfica característica de las recesiones de flujo, ya que da una percepción de la capacidad de almacenamiento y del tiempo de "Vida Media" de la cuenca, además de obtener la constante de recesión que se requiere como punto de partida en la separación de flujo base mediante algoritmos numéricos.

El proceso de separación de flujo base mediante algoritmos numéricos, implica la calibración de diferentes coeficientes, de manera que el caudal base se ajuste gráficamente lo mejor posible al caudal total en épocas de recesión. Para tal fin, se decidió elaborar un programa en lenguaje de Matlab, mediante la herramienta GUIDE, que permite la aplicación de cinco (5) algoritmos numéricos en un ambiente amigable y de fácil manejo que cuenta con interacción de archivos *.xls y *.xlsx (Excel).

Con los resultados obtenidos durante este trabajo se espera que las empresas prestadoras del servicio de agua potable puedan realizar predicciones de caudales mínimos y dispongan de herramientas de manejo de abastecimiento en épocas críticas como las que genera el fenómeno del Niño.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Realizar la separación de flujo base en la cuenca del Río de Oro sobre la estación El Conquistador mediante un algoritmo no lineal, que se ajuste a los datos disponibles.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

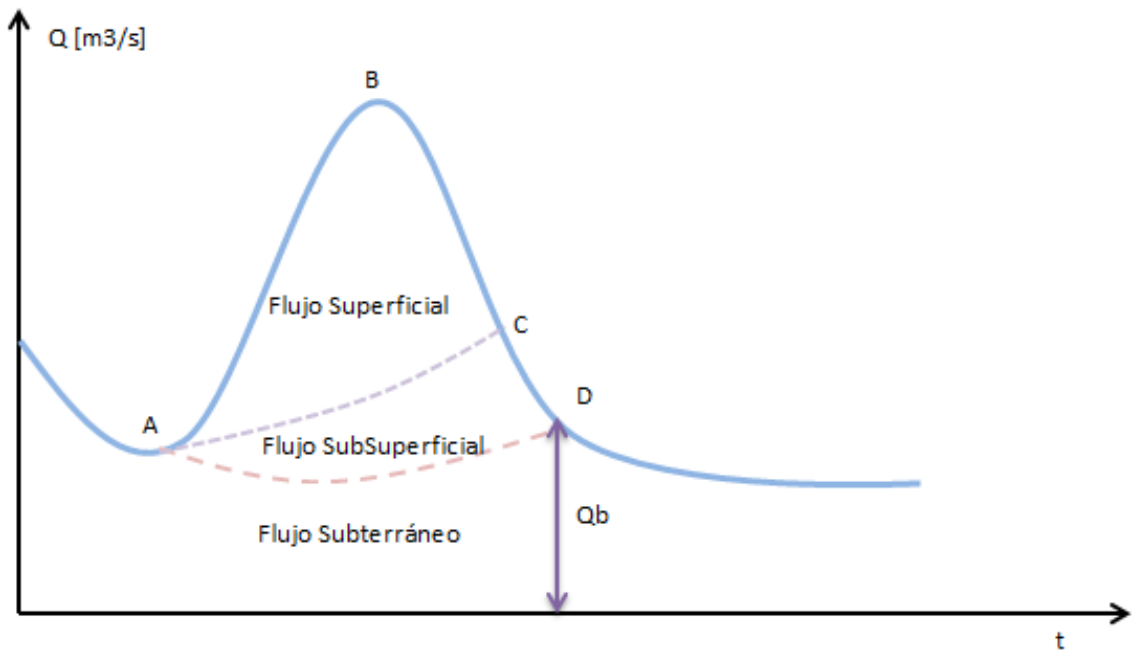
- Calcular la curva maestra de recesión (CMR) de flujo base. superponiendo tramos de recesión observados en los datos de caudales registrados en la estación El Conquistador de la Cuenca del Río de Oro.
- Estimar las constantes de recesión empleando la CMR y analizar su relación con formaciones acuíferas en la Cuenca del Río de Oro
- Seleccionar el algoritmo más apropiado para la separación de flujo base en la Cuenca del Río de Oro, realizando una comparación de los algoritmos analizados; que se espera incluya formas no lineales.
- Programar algoritmos no lineales para la estimación del flujo base de una cuenca utilizando el lenguaje de Matlab.
- Estimar el caudal aproximado de la cuenca estudiada en época de no lluvia, utilizando la CMR.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 HIDROGRAMA

El hidrograma es una gráfica que representa la variación de caudal en un río a través del tiempo, la forma de éste tendrá características diferentes en función de parámetros físicos de la cuenca como la geomorfología, tipo de cobertura, uso del suelo, la geología y las formaciones acuíferas en contacto con el río. Así mismo, permite conocer información del comportamiento de la cuenca como caudales mínimos y máximos (Figura 1).

Figura 1. Hidrograma y sus componentes



Fuente: Autores

A pesar que su forma varía con cada evento de lluvia se pueden observar los tres componentes importantes que conforman el hidrograma: flujo superficial o escorrentía directa, flujo subsuperficial y flujo base o subterráneo.

1.1.1 Escorrentía superficial. La escorrentía superficial es el flujo que llega más rápido hasta la salida de la cuenca (Aparicio 1992), algunas de sus características principales son:

- Calidad igual que la del evento de lluvia precedente.
- Volumen de escorrentía depende directamente de las características topográficas, geológicas y climatológicas de la cuenca.

Como se observa en la Figura 1, este tipo de flujo comienza en el punto de levantamiento (A) y termina en el punto C a partir del cual el escurrimiento cambia a ser subsuperficial.

1.1.2 Flujo Subsuperficial. Es una parte del agua infiltrada que viaja paralelamente a la superficie del suelo. La velocidad de salida de este flujo en la cuenca varía según la permeabilidad del suelo, es decir, si es alta podría asociarse con el escurrimiento directo, ya que viaja de manera rápida, de lo contrario puede considerarse parte del subterráneo. Por lo tanto es difícil de distinguir.

1.1.3 Flujo Base. El escurrimiento subterráneo, es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca, su volumen y velocidad de respuesta dependen de las características físicas de los acuíferos en contacto con el río. Difícilmente se le puede relacionar con una tormenta en particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña, y su suelo muy permeable. Es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias debido a que se produce bajo el nivel freático (Aparicio, 1992).

1.2 CURVA DE RECESIÓN

Después de un evento de lluvia, el hidrograma comienza a disminuir fuertemente, dando inicio a la curva de recesión, la cuál modela y describe el comportamiento del flujo del río en épocas secas, formada principalmente de flujo base y continúa hasta el próximo evento. Generalmente se interpreta matemáticamente como una función exponencial decreciente de tipo lineal:

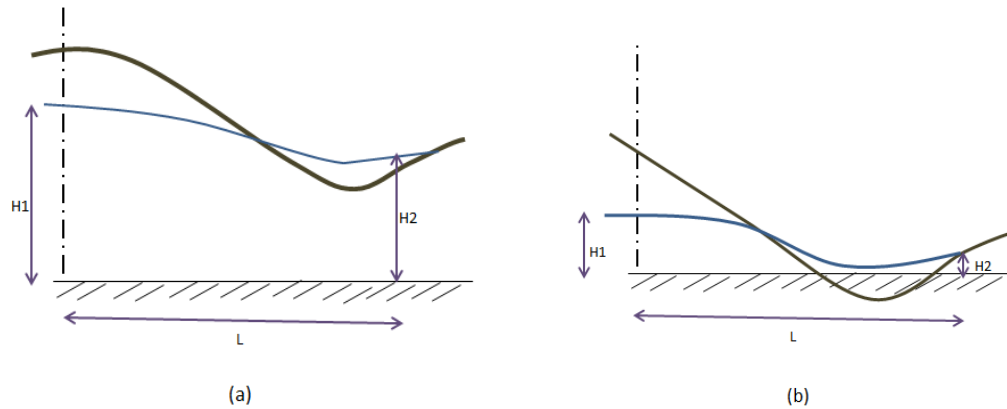
$$Q_t = Q_0 e^{-t/\alpha} \quad (1)$$

Donde Q_t es la descarga en el tiempo t , Q_0 la descarga inicial y α es la constante de recesión que representa el tiempo de una “vida media” en días, el cual es el tiempo necesario para que el flujo base disminuya a un punto donde $Q_t/Q_0 = 0,5$ (Chow et al, 1994), de igual manera, se llama constante de recesión a la pendiente de la curva en escala logarítmica (k), ecuación 2

$$k = \frac{1}{\alpha} [T^{-1}] \quad (2)$$

La función exponencial implica que el acuífero reacciona como un simple reservorio lineal donde el almacenamiento es proporcional a la salida del acuífero $S = \alpha Q$. En este caso, de la gráfica en escala logarítmica de Q_t contra t , se obtendría una línea recta (Wittenberg, 1999). Este comportamiento puede observarse en zonas que presenten principalmente, suelos homogéneos con mayor presencia de arenas, arcillas y limos; y bajo gradiente hidráulico entre el nivel del río y el flujo en la ladera. Sin embargo, en la cuenca alta del Río de Oro se presentan acuíferos de roca fracturada, y laderas muy inclinadas.

Figura 2. Esquema de la sección transversal a) comportamiento lineal b) comportamiento no lineal.



Fuente: Autores

Encontrar recesiones que sigan esta linealidad no es común por lo cual algunos autores han propuesto un análisis no lineal entre la relación almacenamiento descarga por adición de un exponente b:

$$S = aQ^b \quad (3)$$

El reservorio lineal es un caso especial con $b=1$. Combinando la ecuación anterior con la ecuación de continuidad de un reservorio sin recarga, $\frac{dS}{dt} = -Q$, el resultado de la ecuación de la curva de recesión para el reservorio no lineal que empieza a cualquier descarga inicial Q_0 es:

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{1-b}}{ab} t \right]^{\frac{1}{b-1}} \quad (4)$$

Expresión encontrada por Coutagne (1948). Donde el valor del parámetro adimensional b esta alrededor de 0.5 y puede variar entre 0 y 1. Un valor alto podría deberse a un flujo subsuperficial turbulento o a la contribución de acuíferos lineales, sin embargo, la mayoría de los ríos presentan un bajo valor de este parámetro, que genera una curva más cóncava, debido posiblemente a la variación espacial de la lluvia y al aporte de otros acuíferos cuya contribución no

está claramente identificada (Wittenberg, 1999). Mientras que el valor del parámetro a se encuentra mediante calibración.

Aplicar estas ecuaciones a una sola curva de recesión permite el análisis de una tormenta en particular, pero cuando se tiene una serie de datos de caudal, se requiere encontrar parámetros que modelen el comportamiento general de todas las recesiones, por lo cual se recurre a la Curva Maestra de Recesión (CMR) la cual es una gráfica característica de las recesiones de flujo, que se calcula superponiendo muchas de las curvas de recesión que se observan en una corriente dada (Chow et al, 1994) y ajustándolas horizontalmente hasta que se traslaparan en sus partes principales, y con la cual se obtienen parámetros medios.

1.3 METODOLOGÍAS DE SEPARACIÓN

La elección del método más apropiado para separar el flujo base depende, entre otros factores, del tipo de análisis que se desee realizar y la cantidad de datos de caudal que se posean.

1.3.1 Métodos gráficos. No son la mejor herramienta para separar el flujo base, ya que no tienen en cuenta los parámetros físicos de la cuenca, pero estos pueden dar resultados con buena aproximación, de manera espacial, en tormentas pequeñas. En general subestiman el volumen del flujo base (Aparicio, 1992)

1.3.2 Métodos químicos. Estos métodos se fundamentan en ecuaciones balance de masa y flujo de trazadores en una cuenca (Uhlenbrook *et al*, 2002), el más usado es la separación mediante isótopos estables, es decir, isótopos que no experimentan desintegración, pudiendo ser usados como trazadores que sigan los elementos del ciclo del agua en su curso natural (Gómez & Guzmán, 2011).

1.3.3 Métodos de algoritmos. Estos métodos están basados en la reproducción de señales de alta y baja frecuencia representando el flujo superficial y subterráneo respectivamente, utilizando el hidrograma. A su vez, permite realizar la separación de los componentes del hidrograma en un periodo largo y continuo.

A lo largo de la historia se han realizado muchas investigaciones sobre estos algoritmos, que han arrojado como resultado el desarrollo de una cantidad importante de métodos válidos, lo cual conlleva que para cada estudio individual se busque el o los algoritmos más apropiados para la separación de flujo base, ya sea mediante un mejor ajuste o la comparación de resultados de análisis anteriores.

Varios autores han hecho la recopilación de los diferentes algoritmos de separación como Chapman (1999), Chapman & Maxwell (1996) y Brodie & Hostetler (2005), entre los cuales se encuentran:

Algoritmo de un parámetro. Lyne y Hollick (1979) consideran que la forma del filtro implica que el flujo base se mantiene constante cuando no se presenta escorrentía directa y proponen una reformulación, la cual fue simplificada (Chapman y Maxwell, 1996), a una forma basada en que el flujo base es un promedio ponderado entre el escurrimiento directo y el flujo base en el intervalo de tiempo anterior, es decir:

$$Q_b(i) = kQ_b(i - 1) + (1 - k)Q_d(i) \quad (5)$$

Donde $Q_b(i)$ y $Q_d(i)$ son el flujo base y escorrentía directa, respectivamente, en el intervalo de tiempo i , y el parámetro k es la constante de recesión durante los periodos sin escorrentía directa, en unidades de $[T^{-1}]$, ocasionando que el flujo base adopte la forma del hidrograma.

El caudal total Q es la suma del flujo base Q_b y la escorrentía directa Q_d , por lo tanto se obtiene la siguiente forma del algoritmo de recesión:

$$Q_b(i) = \frac{k}{2-k} Q_b(i-1) + \frac{1-k}{2-k} Q(i) \quad (6)$$

Condicionada por $Q_b(i) \leq Q(i)$

Algoritmo de dos parámetros de Boughton (1993). Proporciona mayor flexibilidad al introducir un segundo parámetro C , en lugar de $(1-k)$, se ha recomendado que el valor de este parámetro sea seleccionado basado en la inspección de la forma del flujo al final de la escorrentía, particularmente para grandes eventos (Chapman y Maxwell, 1996). Además, este algoritmo incorpora mayor complejidad y subjetividad al momento de su calibración.

El valor del coeficiente C indica la respuesta rápida del flujo, adoptando los picos a medida que aumenta este valor, lo cual físicamente refleja que, debido a la permeabilidad de la cuenca, en eventos de lluvia se recargan las fuentes subterráneas, convirtiendo el exceso de agua en escorrentía directa.

$$Q_b(i) = \frac{k}{1+C} Q_b(i-1) + \frac{C}{1+C} Q(i) \quad (7)$$

Condicionada por $Q_b(i) \leq Q(i)$

Algoritmo de tres parámetros, Método de IHACRES (1993). Se basa en que el exceso de lluvia μ es dividido en componentes lento y rápido, nombrados Q_b y Q_d

$$\begin{aligned} Q_b(i) &= \beta_s \mu(i) - \alpha_s Q_b(i-1) \\ Q_d(i) &= \beta_q \mu(i) - \alpha_q Q_d(i-1) \end{aligned} \quad (8)$$

Donde α y β son los parámetros del algoritmo y los sufijos q y s se refieren a la respuesta del flujo, rápido y lento respectivamente, cabe notar que α_q y α_s son

negativos y describen la tasa de decrecimiento del hidrograma mediante una unidad de entrada de exceso de lluvias. Los parámetros β_q y β_s definen el pico del componente del hidrograma. (Jakeman *et al.* 1993)

Eliminando el exceso de lluvia μ de estas ecuaciones, y expresando la escorrentía directa como la diferencia entre el flujo base Q_b y la descarga total del río Q_d , da como resultado la siguiente ecuación para el flujo base:

$$Q_b(i) = \frac{\alpha_s \beta_q}{\beta_q + \beta_s} Q_b(i-1) + \frac{\beta_s}{\beta_q + \beta_s} [Q(i) + \alpha_q Q(i-1)] \quad (9)$$

Remplazando $C = \frac{\beta_s}{\beta_q}$, $k = -\alpha_s - \alpha_s \frac{\beta_s}{\beta_q}$, en la ecuación anterior, se obtiene el algoritmo de tres parámetros:

$$Q_b(i) = \frac{K}{1+C} Q_b(i-1) + \frac{C}{1+C} [Q(i) + \alpha_q Q(i-1)] \quad (10)$$

Algoritmo de Nathan y McMahon. Esta técnica no tiene una base física real, sin embargo, proporciona una estimación objetiva y repetible de un índice de flujo base que es fácilmente automatizado.

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad (11)$$

Donde q_t es la escorrentía superficial filtrada (respuesta rápida) en el paso de tiempo t , Q_t es el caudal original y β es el parámetro de filtro para el cual se recomienda un valor de 0.925 para datos diarios. Este filtro se debe aplicar en 3 pasos (hacia adelante, hacia atrás y hacia adelante), sin embargo se tomará como base de comparación en el presente estudio, el segundo paso, que según el trabajo realizado por Machuca (2012) es el que mejor se ajusta.

El flujo base, se calcula con la ecuación:

$$b_t = Q_t - q_t \quad (12)$$

Cabe resaltar que la componente de flujo base no puede ser mayor que el flujo total ni menor que cero y el coeficiente β está relacionado con la forma del hidrograma

Algoritmo de Smakhtin & Watkins. Este algoritmo parte del filtro descrito por Nathan y McMahon (1990), encontrando así la componente de escorrentía superficial (respuesta rápida) y hallando el flujo base de la diferencia entre el flujo total obtenido inicialmente de la estación limnimétrica Conquistador Alto y el flujo obtenido por la ecuación.

$$q_t = \alpha q_{t-1} + \beta(1 + \alpha)(Q_t - Q_{t-1}) \quad (13)$$

Donde q_t es la escorrentía superficial filtrada en el paso de tiempo t , Q_t es el caudal original y α y β es los parámetros de filtro para el cual según estudios en cuencas de Sur África los valores a los cuáles se ajustaron fueron 0.997 y 0.5 respectivamente para datos diarios. Al igual que el método anterior, el flujo base, se calcula con la ecuación (12).

2. METODOLOGÍA

Como primer paso para realizar la separación de flujo base es importante construir la curva maestra de recesión que permita identificar si se presenta un comportamiento lineal o no de los caudales base del río, y así mismo, hallar las constantes de recesión medias, para toda la serie de datos trabajados, que se utilizarán en los algoritmos de uno y dos parámetros como coeficiente de entrada.

2.1 ZONA DE ESTUDIO

La separación de flujo base se realizará utilizando los datos de la estación Conquistador Alto, ubicada en la subcuenca del Río de Oro Alto, que hace parte de la cuenca superior del río Lebrija, la cual, presenta gran variedad en su composición litológica, como zonas cársticas en su parte alta, que por efecto de la lluvia, ha generado la aparición de conductos que facilitan el transporte de agua hasta la partes más bajas, en la parte media, presenta formaciones que funcionan como esponjas retenedoras de humedad que favorecen el almacenamiento de agua subterránea. Así mismo, presenta diversidad en la distribución de las lluvias, características que llevan a pensar en un comportamiento no lineal de la relación almacenamiento-descarga de agua subterránea.

2.2 ANÁLISIS DE ÉPOCAS DE RECESIÓN

Para realizar el análisis de recesión, se utilizará un periodo para el cual no se presentaron grandes interrupciones en la toma de datos en la estación hidrométrica automática en la cuenca alta del Río de Oro, y los cuales fueron obtenidos del proyecto de Cervantes & Fajardo (2011) mediante el análisis y correlación de datos proporcionados por el CTD Diver, Baro Diver y Diver

identificando los niveles del agua, y las curvas de calibración hechas por Flórez & Rueda (2009).

Partiendo de estos, se analizará el hidrograma para encontrar las épocas de no lluvia, en las cuales se ve reflejado el comportamiento de los acuíferos que alimentan la cuenca del Río de Oro Alto. En la Tabla 1, se resumen las tres épocas de recesión registradas durante 30 meses, octubre de 2008 y marzo de 2011, en la estación Conquistador Alto.

Tabla 1. Épocas de recesión.

Periodo	Duración aprox.	Observaciones
29/11/2008 al 14/02/2009	80 días	Solo se presentaron pequeñas lluvias.
24/06/2009 al 30/07/2009	38 días	Solo se presentaron pequeñas lluvias.
18/11/2009 al 16/03/2010	120 días	Aunque se presentaban pequeñas lluvias, estas no tuvieron un gran efecto en el caudal, por lo tanto es un tiempo bastante considerable y crítico. Fenómeno de "El Niño"
20/12/2010 al 22/02/2011	60 días	Fue una recesión corta debido al fenómeno de "La Niña"

2.3 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA MAESTRA DE RECESIÓN (CMR)

La curva maestra de recesión se construyó con las recesiones anteriormente identificadas. Realizando el siguiente procedimiento:

- Graficar todos los tramos escogidos en escala logarítmica.
- Identificar el tramo que tenga el mayor caudal inicial.
- Tomar la siguiente serie de datos y hacer coincidir con la primera horizontalmente y lo mismo se hace con cada uno de los tramos Figura 3.

Figura 3. Curva Maestra de Recesión



Fuente: Autores

2.4 ANÁLISIS DE LA CONSTANTE DE RECESIÓN

Con la forma lineal de la CMR, la constante de recesión (α) se obtiene como el inverso de la pendiente (k) con que decrece la curva (Tabla 2).

Tabla 2. Constantes de recesión

	Pendiente (k) [día⁻¹]	Cte de recesión (α) [día]
	0.013	76.92
	0.004	250
	0.002	500
Promedio	0.0063	158.7

Esta forma de la CMR muestra en la parte inicial, una constante de recesión baja, lo que se traduce como una corta vida media, siendo estas recesiones pequeñas en época de lluvia. La última parte muestra un decrecimiento lento, interpretado

como un comportamiento más constante, es decir, el agua infiltrada demora mucho más tiempo en salir de la cuenca.

Para el análisis de resultados, se tomará una constante de recesión promedio, 158.7 días, la cual es bastante alta, en comparación con otros estudios en zonas cercanas, como es el caso de la estación Café Madrid, cuya constante de recesión se encuentra alrededor 2 días (Serrano & Balaguera, 2006), lo que indica que la cuenca del río de Oro Alto cuenta con una alta calidad de almacenamiento, es decir, que para épocas de recesión, se tendrá una buena reserva que se traduciría en un caudal fijo, y además, podría estar siendo alimentada por acuíferos de la parte alta de la cuenca del Río Lebrija y posiblemente fuera de ella.

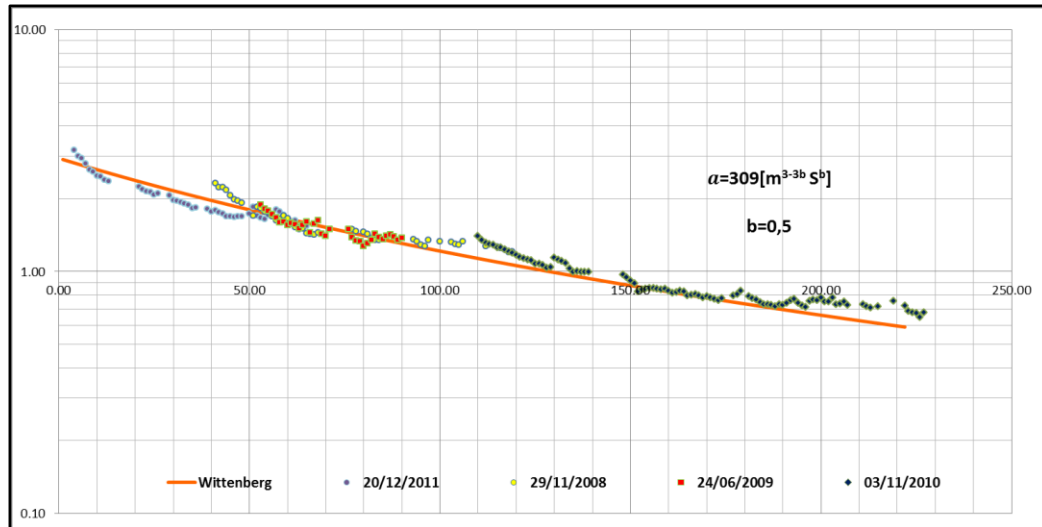
Sin embargo, al graficar los segmentos de recesión en escala logarítmica se observa que existe cierta no linealidad en el flujo, pues se logran identificar al menos tres pendientes diferentes, por lo cual se hace necesario realizar un análisis no lineal estimando los parámetros a y b de la ecuación 4.

Teniendo en cuenta las condiciones geológicas, climáticas y morfológicas de la zona, la forma no lineal de la curva maestra de recesión, sería la que mejor representa el comportamiento del flujo entre el río y el acuífero. Ajustando la ecuación de Coutagne (1948), se obtuvieron los coeficientes $a=309[m^{3-3b} S^b]$ y $b=0.5$. (Figura 4) con el menor error estándar.

Según estudios realizados (Moore, 1997; Schwarze et al., 1997), físicamente, es normal que en este tipo de cuencas de montaña se presenten dos o más constantes de recesión diferentes para una misma curva maestra, debido a que las recesiones son no-lineales, y no siguen un valor simple que relacione el almacenamiento y la salida del flujo, probablemente por la presencia de diferentes tipos de acuíferos, principalmente en roca fracturada, formaciones cársticas y

algunos en depósitos aluviales, causando un cambio en el comportamiento de la recesión.

Figura 4. Forma no lineal de la CMR



Fuente: Autores

En el caso de la cuenca alta del Río de Oro Alto, estudios realizados por Forero (2012), han indicado que el caudal base se ve afectado por aportes subterráneos de otras cuencas, siendo esto uno de los factores causantes de la no linealidad en la cuenca.

2.5 ESTIMACIÓN CAUDALES EN ÉPOCA DE NO LLUVIA

Con el calentamiento global que se vive actualmente, el clima tiende a volverse más extremo, épocas más prolongadas de fuertes lluvia ocasionando inundaciones y por otro lado, largos periodos sin lluvia, que ponen en riesgo cultivos, ganado y por supuesto el suministro de agua potable a la población. Para lograr que se tomen medidas de racionamiento en el momento oportuno, es necesario estimar caudales para futuras épocas de no lluvia, lo cual es un aspecto importante en el análisis de la recesión.

Para realizar esta estimación, se toma en cuenta la CMR y se parte de la recesión más prolongada que se tiene registrada, comprendida entre los meses de noviembre de 2009 y marzo de 2010, alrededor de 120 días, cuyo caudal inicial (Q_0) es aproximadamente $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para el 18 de noviembre, lo cual permite tener un punto de partida para la estimación de recesiones más fuertes, en este caso se supondrá un periodo de 150 días. Aplicando la ecuación 1 (forma lineal), con la constante de recesión más crítica (76.92 días) el caudal obtenido es de $0.21 \text{ m}^3/\text{s}$, y el caudal obtenido es de $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$ aplicando la ecuación 4 (forma no-lineal), con coeficientes $a = 309 [m^{3-3(0.5)} s^{0.5}]$ y $b = 0.5$.

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{1-b}}{ab} t \right]^{\frac{1}{b-1}} = 1.5 \left[1 + \frac{(1-0.5) * 1.5^{1-0.5}}{309 * 0.5} * 150 \right]^{\frac{1}{0.5-1}}$$

$$Q_t = 0.59 \text{ m}^3/\text{s}$$

Según la Empresa Piedecuestana de Servicios Públicos ESP, la planta de potabilización La Colina, que abastece al municipio de Piedecuesta, requiere para su funcionamiento en promedio un caudal de $0.31 \text{ m}^3/\text{s}$. Se encontró que el caudal del Río de Oro, en la estación Conquistador Alto, en un periodo de no lluvia de cinco meses es de $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$; por lo tanto se espera que el río pueda abastecer el acueducto en ese periodo de recesión.

Además, se verificó que el acueducto podría presentar inconveniente en su operación por falta del recurso hídrico, en un periodo de no lluvia cercano a 10 meses, siendo este un tiempo de recesión poco probable. Así mismo, utilizar la forma lineal, da resultados poco confiables, ya que subestima la capacidad de almacenamiento de la cuenca. Sin embargo, la aproximación del valor de flujo mínimo debería ir acompañada de un estudio sobre el caudal ambiental del Río de Oro, para cerciorarse si se deben tomar o no medidas de prevención.

3. APLICACIÓN DE ALGORITMOS DE SEPARACIÓN

La necesidad de calibrar los diferentes algoritmos de manera sencilla, gráfica e interactiva, llevó a buscar la mejor alternativa para cumplir este propósito. Optando por desarrollar un programa en Matlab, que presenta un lenguaje sencillo y adicionalmente, la escuela de Ingeniería Civil cuenta con licencias para su uso.

El programa fue llamado “ALGORITMOS DE SEPARACIÓN G2”, y permite escoger entre los algoritmos mostrados en el subcapítulo 1.3, para ser aplicados, así mismo grafica y tabula los resultados, calcula el porcentaje de flujo base para cada método escogido y permite exportar las tablas a Excel, el cual es un programa de fácil manejo para posteriores trabajos.

3.1 USO DEL PROGRAMA “ALGORITMOS DE SEPARACIÓN G2”

El programa desarrollado cuenta con una interfaz gráfica (Anexo A) donde se observan 6 botones principales:

- Datos: Da la opción de elegir el archivo de entrada (*.xls o *.xlsx)
- Calcular: Aplica los algoritmos elegidos por el usuario; los datos completos de la separación se dan en la tabla y gráfica, adicional a esto se muestra el porcentaje de flujo base sobre la escorrentía total, para cada algoritmo.
- Exportar: Crea un archivo de Excel con los resultados.
- Limpiar: Reinicia el programa.
- Salir: Cierra el programa.
- About: Muestra información general de los autores.

3.1.1 Entrada de datos. Para ejecutar el programa se debe tener un archivo de Excel *.xls o *.xlsx que contenga la información de los caudales, estructurado como lo indica la Tabla 3.

Tabla 3. Estructura archivo de entrada de datos

Fecha (formato general)	Q (m³/s)
39723	2,26
39724	2,20
39725	2,11
39726	2,03
39727	2,99
39728	3,22

- Se requiere una columna con la fecha en formato general o texto, pues aunque Excel y Matlab almacenan las fechas como números de serie secuenciales, difieren en su origen, 1 de enero de 1900 para Excel y 1 de enero de 0000 para Matlab, por lo tanto si se ingresara en formato fecha se generaría un desfase. Así mismo, esta columna permite graficar los datos.
- Y por último se requiere el caudal observado en unidades de **m³/s**.

3.1.2 Calibración de algoritmos. Para aplicar los algoritmos deben ajustarse los parámetros hasta que el hidrograma y el flujo base se asemejen en la curva de recesión, teniendo presente que en ningún momento el flujo base supere la escorrentía total.

El programa incluye la opción de elegir entre cinco diferentes algoritmos, un parámetro, dos parámetros, tres parámetros, Smakhtin y el algoritmo de Nathan & McMahon, la decisión de programar estos algoritmos fue basada en el artículo de Chapman (1999) y en los trabajos de grado anteriormente realizados sobre este tema en la Universidad Industrial de Santander.

Una vez elegidos, se pide ingresar un valor inicial para los parámetros que corresponden a cada algoritmo, al ejecutar el programa, posiblemente la separación del hidrograma mostrado en la gráfica, no sea lo esperado, por lo tanto se deben variar los parámetros hasta que se asemeje el caudal base con las curvas de recesión.

Posterior al ajuste, se da la opción de exportar los resultados a Excel, creando un archivo nuevo, o creando una hoja dentro de un archivo existente.

3.1.3 Aplicación del programa G2 en la Estación Café Madrid. Para comprobar que el programa “ALGORITMOS DE SEPARACIÓN G2” está en capacidad de calcular el flujo base de cualquier cuenca, se analizaron los datos de la Cuenca Superior de Rio Lebrija en la estación de Café Madrid y se compraron con los resultados obtenidos con el programa “BASE FLOW SEPARATOR (BFS)” (Serrano & Balaguera, 2006),

Después de aplicar el programa G2, se obtiene el porcentaje de flujo base para cada algoritmo, los cuales se pueden comparar con los encontrados con el programa BFS registrados en el trabajo del 2006, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de porcentajes de flujo base BFS y G2

Metodología	BFS	G2	%
1 parámetro	54.29 %	54.29 %	99.9
2 parámetros	73.98 %	73.11 %	98.8
3 parámetros	71.12 %	71.12 %	100

Con lo anterior se concluye que el programa “ALGORITMOS DE SEPARACIÓN G2” se puede aplicar en cualquier cuenca, mientras que se cuente con datos de caudal.

3.2 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ALGORITMOS DE SEPARACIÓN EN LA ESTACIÓN CONQUISTADOR ALTO

La separación de flujo base se llevó a cabo mediante algoritmos numéricos, ya que, en el caso de estudio, son los más apropiados teniendo presente que se

quiere hacer un análisis a una serie de datos continua y que no se cuenta con datos necesarios para realizar una separación por métodos químicos.

Este proceso se realizó sobre la totalidad de los datos diarios promedio obtenidos de la estación Conquistador Alto.

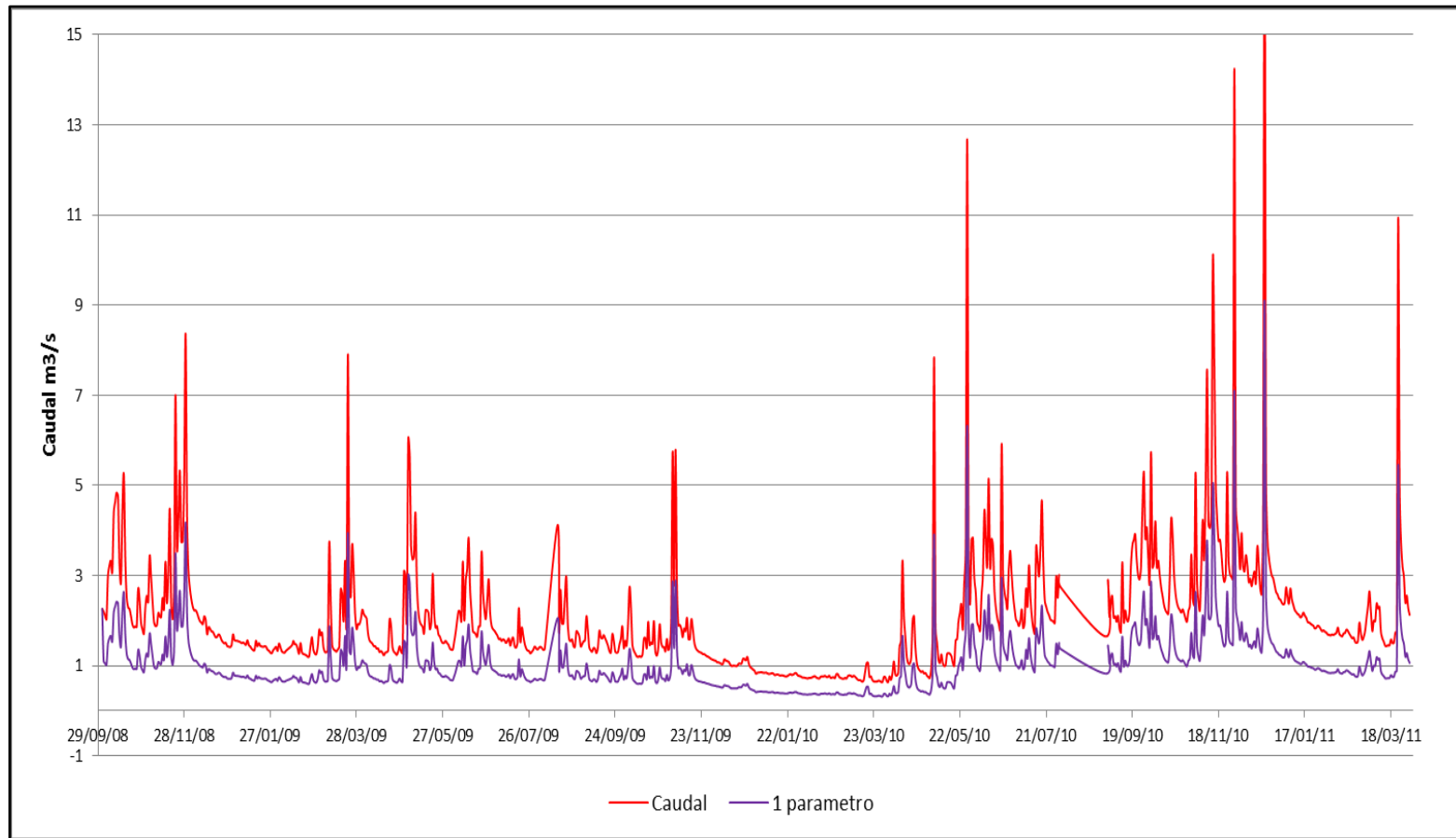
3.2.1 Algoritmo de un parámetro. El parámetro necesario para aplicar este algoritmo es la constante de recesión k , en unidades de $[T^{-1}]$, la cual se obtuvo previamente con la curva maestra de recesión con un valor de **0.0063** día⁻¹.

La Figura 5 muestra la separación de flujo mediante el algoritmo de un parámetro, donde se observa que el caudal base toma la forma del hidrograma sin tocar la recesión. Durante el proceso de calibración, se observó que la pendiente de la CMR durante los periodos sin escorrentía directa, ocasiona que el flujo base adopte la forma del hidrograma.

Una vez aplicado el algoritmo de separación se obtuvo un porcentaje de flujo base del 50% con datos diarios, el cual es un valor bastante bajo, teniendo en cuenta las características de la cuenca.

3.2.2 Algoritmo de dos parámetros de Boughton. En este algoritmo intervienen dos coeficientes, uno es la constante de recesión promedio $k=0.0063 [T^{-1}]$ y el parámetro $C = 2.5$, cuyo valor fue encontrado mediante su variación hasta que los datos modelados se aproximaran a los datos observados.

Figura 5. Separación del hidrograma mediante algoritmo de un parámetro



Fuente: Autores

A medida que aumenta el valor del coeficiente C , se incrementa la altura de los picos del caudal base, lo cual físicamente indica que, debido a la permeabilidad de la cuenca, en eventos de lluvia se recargan las fuentes subterráneas, convirtiendo el exceso de agua en escorrentía directa.

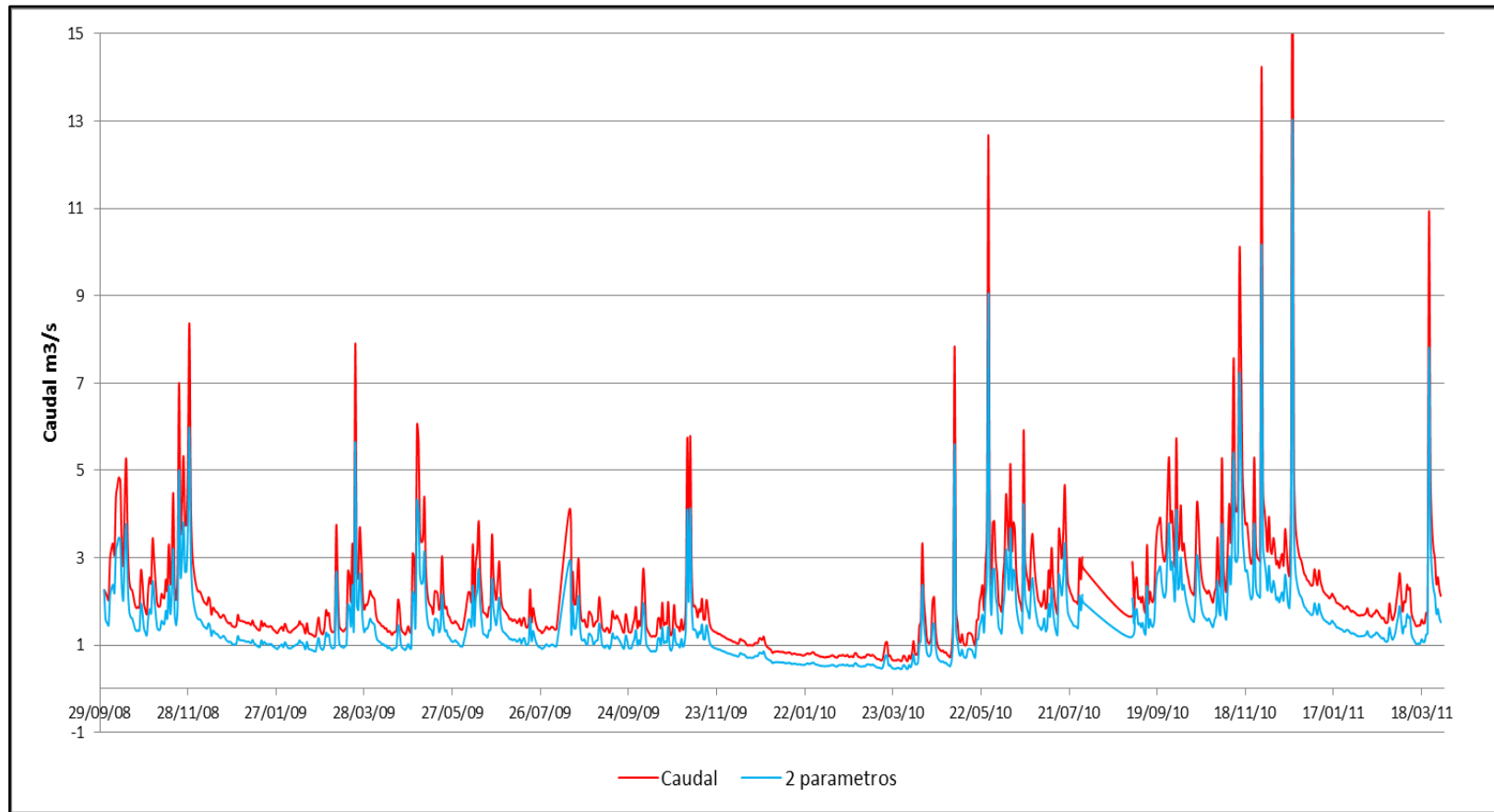
La Figura 6 muestra la separación de flujo base mediante el algoritmo de dos parámetros de Boughton, donde se observa que el caudal base toma la forma del hidrograma sin tocar la recesión y además, tiene un mejor ajuste que el algoritmo de un parámetro. Finalmente se obtuvo, aplicando el algoritmo de dos parámetros de Boughton, un porcentaje de 72% de caudal base.

3.2.3 Algoritmo de tres parámetros, método de IHACRES. La aplicación de este algoritmo conlleva mayor grado de dificultad, ya que no utiliza los parámetros anteriormente encontrados, k y C , sino que involucra índices de flujo lento (s) y rápido (q), que fueron igualmente hallados usando el programa G2. Una vez calibrado el algoritmo de tres parámetros, método de IHACRES, se obtuvieron los siguientes coeficientes:

$$\alpha_q = -0.12 \quad \alpha_s = -0.98 \quad \beta_q = 4 \quad \beta_s = 0.6$$

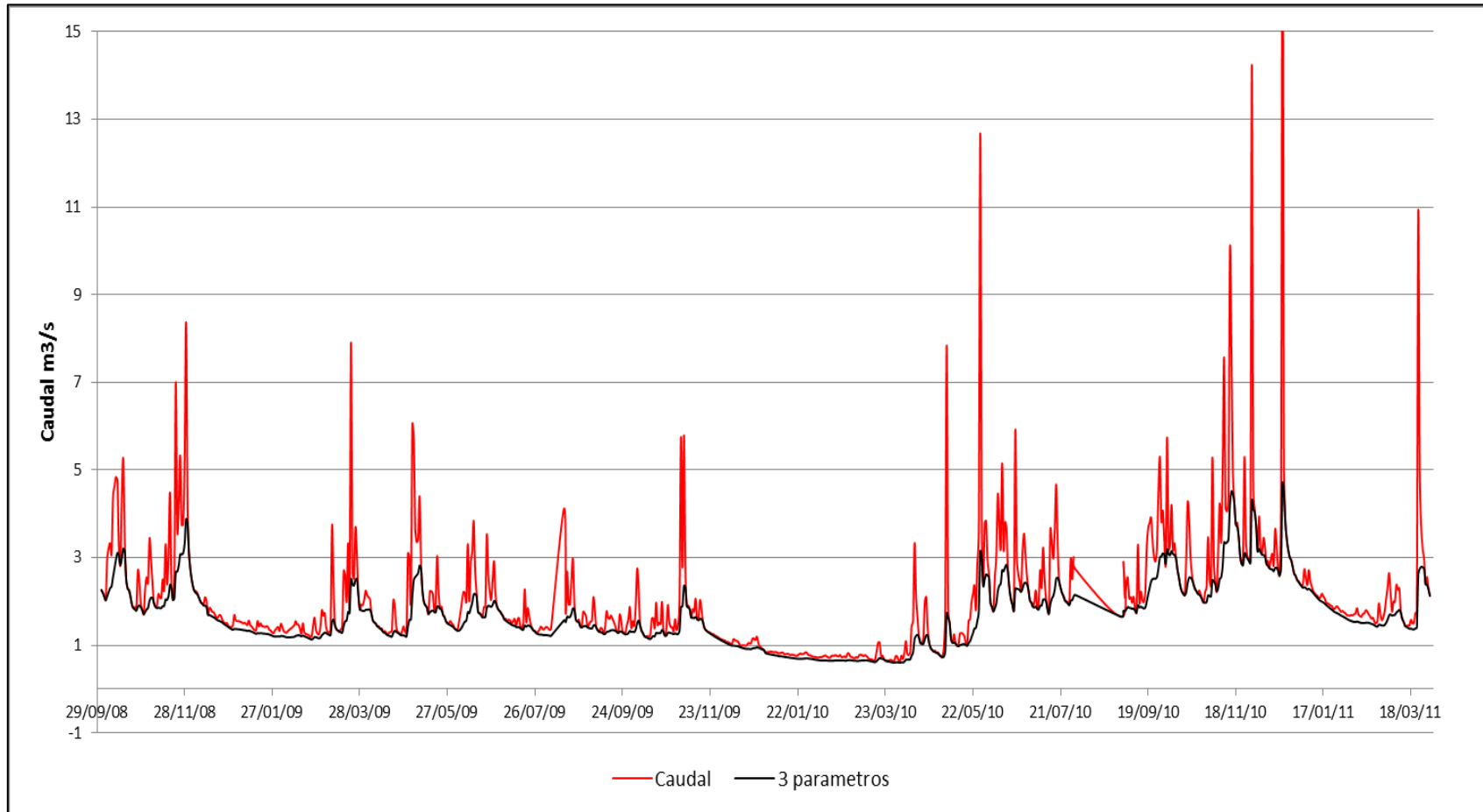
Con los cuales se logró que el caudal base tomara la forma del hidrograma en la recesión, lo que representa un mejor ajuste que los anteriores algoritmos, como se observa en la Figura 7. Así mismo se obtuvo un 81% de flujo base, lo que revela una buena calidad de almacenamiento de la cuenca estudiada. Al realizar la separación se puede notar que la relación de β_s/β_q tiene un efecto similar a la constante C vista en la ecuación de dos parámetros, es decir, se interpreta como la respuesta inmediata en la recarga de los acuíferos, así, un bajo valor de esta relación señala una recarga más rápida (picos altos), mientras un valor mayor, indica una recarga lenta (picos bajos). Por otro lado las constantes α_q y α_s permiten ajustar el flujo base en las épocas de recesión, dando la forma del hidrograma.

Figura 6. Separación del hidrograma usando algoritmo de dos parámetros



Fuente: Autores

Figura 7. Separación del hidrograma usando algoritmo de tres parámetros



Fuente: Autores

3.2.4 Algoritmo de Nathan & McMahon. Este algoritmo fue igualmente programado, usando la el valor de la constante $\beta = 0,925$. Con el programa G2 se obtuvieron resultados para los tres pasos requeridos por el algoritmo (hacia adelante, hacia atrás y hacia adelante).

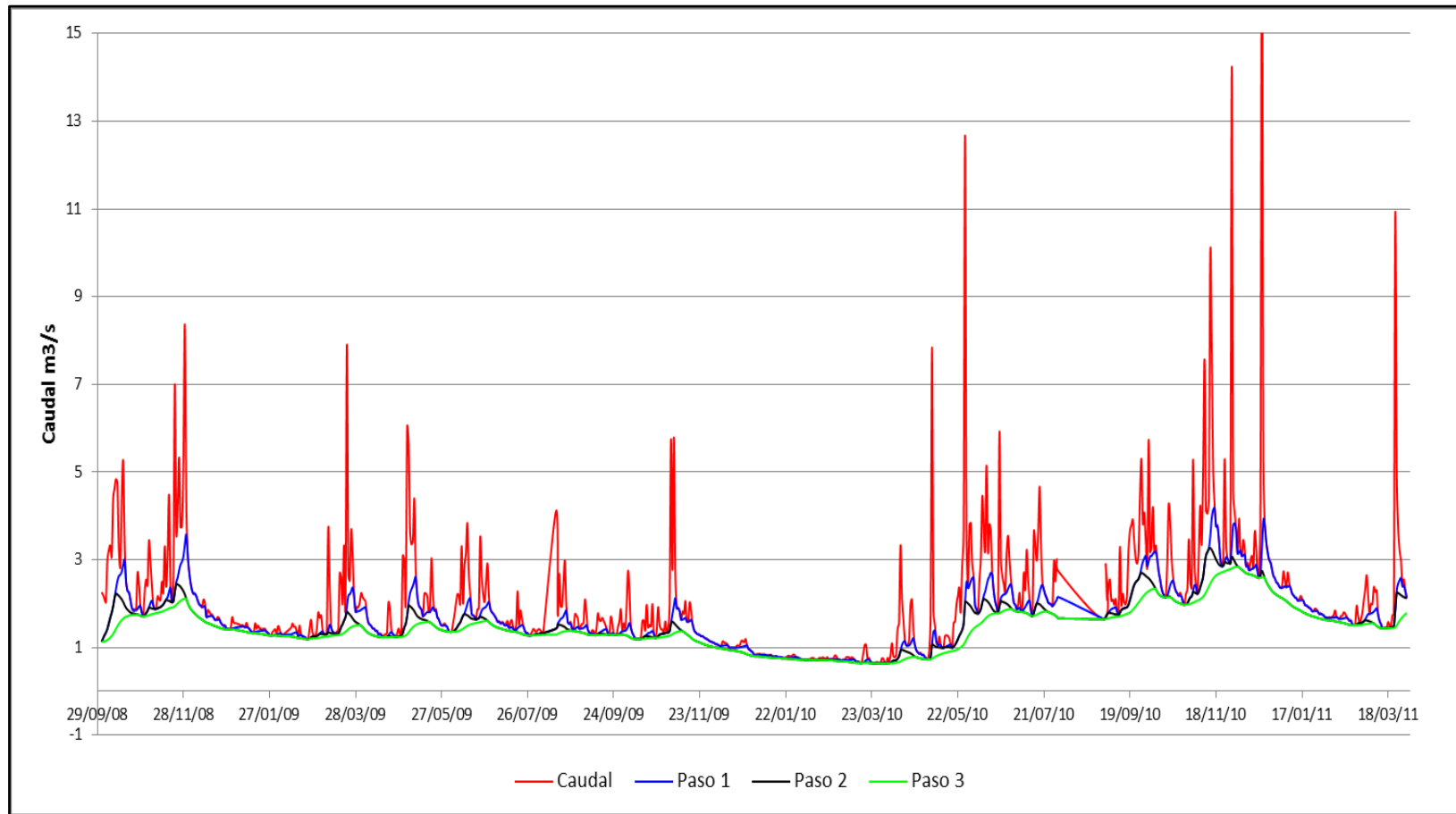
En la Figura 8 se tiene la separación aplicando tres pasos con el algoritmo de Nathan & McMahon, donde además se puede observar que ninguno de ellos toma la forma del hidrograma pero si se unen las recesiones, lo cual se debe a que este algoritmo fue creado mediante un modelo lineal y no requiere el ajuste de ningún parámetro.

Como se había mencionado anteriormente, para este algoritmo se tuvo en cuenta principalmente el segundo paso, con el cual se obtuvo un porcentaje considerablemente alto de 74%.

3.2.5 Algoritmo de Smakhtin & Watkins. Este algoritmo se programó utilizando los valores de $\alpha = 0,997$ y $\beta = 0,5$, como se recomienda en el artículo de Smakhtin (1999). Encontrando la componente de escorrentía superficial y hallando el flujo base de la diferencia entre el flujo total y el flujo obtenido por la ecuación 13.

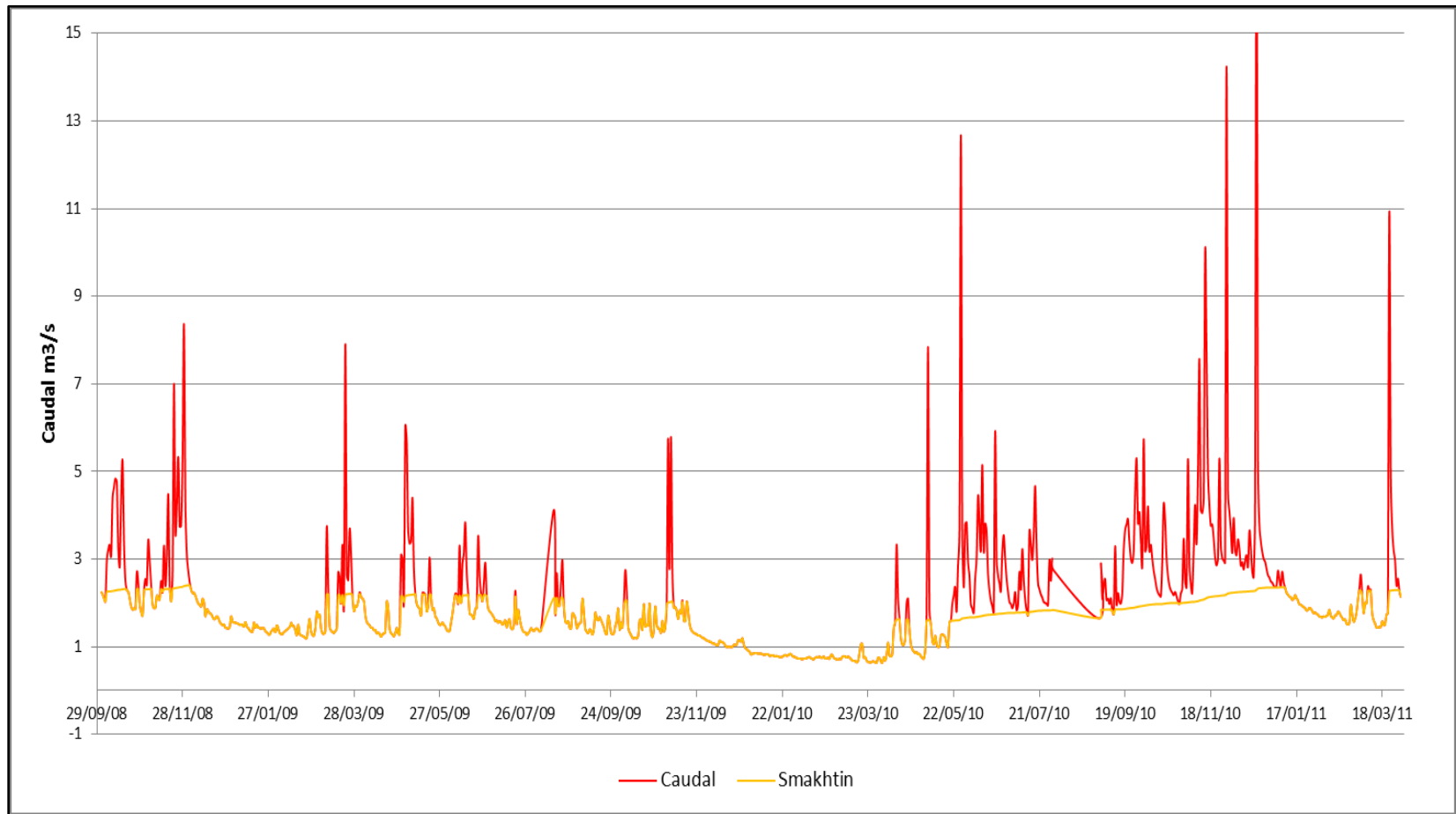
Una vez calibrado este algoritmo se obtuvo un 79 % de flujo base sobre el caudal total, en la Figura 9 se observa que el flujo base se iguala al caudal total a lo largo de todo el hidrograma exceptuando en los picos más altos.

Figura 8. Separación de flujo base con el algoritmo de Nathan & McMahon



Fuente: Autores

Figura 9. Separación de flujo base con el algoritmo de Smakhtin & Watkins



Fuente: Autores

3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizada la separación de flujo base con cada uno de los algoritmos, se escogió el más apropiado para la cuenca del Río de Oro buscando que se ajuste el flujo base a la forma del hidrograma, principalmente en los tramos de recesión, y debido a la permeabilidad que se conoce tiene la cuenca (Forero, 2012), se espera un porcentaje de flujo base aproximado entre 75% y 80%.

Según los resultados arrojados por el programa G2 y graficados anteriormente, la separación con el algoritmo de un parámetro, no es apropiado, ya que presentó un porcentaje de flujo base muy bajo (50%), además a lo largo de todo el hidrograma no se apreció el ajuste en tramos de recesión. Y no era posible realizar un mejor ajuste, ya que este modelo considera un comportamiento lineal de la curva de recesión y solo se cuenta con un parámetro (k).

Al aplicar el algoritmo de dos parámetros de Boughton, se obtuvo un 72% de flujo base, teniendo un mejor ajuste que el algoritmo de un parámetro, debido a la flexibilidad que le da la adición de un segundo coeficiente (C); como se observa en la Figura 6, esta separación mostró picos elevados, es decir, tiene en cuenta la respuesta inmediata de los acuíferos. Sin embargo, en la separación mediante el algoritmo de tres parámetros, modelo de IHACRES, se logró el ajuste deseado, igualándose el caudal base al caudal total en eventos de recesión, arrojando un porcentaje de flujo base del 81%. Para el algoritmo de Nathan & McMahon, tomando como punto de evaluación el paso 2, se apreció un buen ajuste solo para las recesiones largas, por lo cual, no es representativo para toda la serie de datos. Mientras tanto para el algoritmo de Smakhtin, se observa una separación poco confiable, ya que, el caudal base aumenta demasiado, llegando incluso a igualarse a la escorrentía directa lo cual no es muy probable, sabiendo que para este tipo de cuencas, en cualquier evento de precipitación se presenta flujo superficial.

4. CONCLUSIONES

- Se realizó un ajuste lineal y no lineal de la curva maestra de recesión (CMR) con los datos disponibles de caudales en la cuenca alta del Rio de Oro. En el primer caso, no fue posible la obtención de un solo valor de pendiente (α), mientras en el segundo caso, al aplicar la ecuación de Coutagne, se logró modelar de manera precisa el comportamiento de la recesión con una constante $a = 309[m^{3-3b}S^b]$ y $b=0.5$ y se observó, debido a la heterogeneidad de la zona, que el flujo base muestra un comportamiento no lineal.
- Se realizó la separación de flujo base, mediante la aplicación de cinco (5) algoritmos numéricos, al hidrograma obtenido con los datos de caudales de la estación Conquistador Alto medidos durante treinta meses, entre Octubre de 2008 y Marzo de 2011, encontrándose que el algoritmo que mejor se ajusta a los datos, es el modelo IHACRES (tres parámetros). Los valores de los coeficientes obtenidos para este algoritmo fueron $\alpha_q = -0.12$ $\alpha_s = -0.98$ $\beta_q = 4\beta_s = 0.6$, los cuales permiten definir mejor el comportamiento del flujo subterráneo o flujo base. La relación de beta interpreta la respuesta inmediata de la recarga (ajuste de los picos) y el valor de alfa expresa la forma del hidrograma en la recesión, lo cual indica que la obtención de estos coeficientes se ve afectada por las características geomorfológicas de la cuenca, es decir, la no linealidad. El algoritmo de un parámetro no se ajusta ni a los valores altos, ni a las recesiones, el algoritmo de dos parámetros mejora la respuesta de valores altos sin representar las recesiones. Smakhtin y Nathan & McMahon utilizan valores constantes que no tienen en cuenta las características físicas de la cuenca, por lo tanto, no expresan la respuesta esperada.
- El flujo base de esta cuenca montañosa de alta pendiente, fue estimado en 81% mediante el anterior algoritmo de tres parámetros. Este valor es considerado

alto, si se compara con el punto de cierre de la cuenca superior del Río Lebrija (Estación Café Madrid) con un porcentaje de 70%. Por lo tanto se concluye que esta cuenca presenta condiciones altas de almacenamiento de aguas subterráneas (presenta diferentes tipos de acuíferos, principalmente acuíferos fracturados, cársticos y algunos acuíferos en depósitos aluviales intercomunicados entre sí). La recarga de estos acuíferos puede estar originada por infiltración dentro de la cuenca y por infiltraciones de larga distancia (Forero, 2012) y se constituye en una cuenca de altas reservas para los acueductos regionales.

- Se desarrolló el programa en Matlab, mediante la herramienta de GUIDE, “Algoritmos de separación G2”, de fácil manejo, el cual mediante una interface gráfica ofrece una visualización mejorada respecto a los programas ya existentes; para la entrada y salida de datos permite la importación y exportación de archivos en formato *.xls y *.xlsx (Excel) y principalmente permite realizar la separación de flujo base mediante la calibración de los parámetros de 5 diferentes algoritmos numéricos que incluyen no linealidad. Al comparar los datos obtenidos ejecutando este programa sobre una serie de datos de más de 15 años de la estación Café Madrid, con los resultados obtenidos en el estudio realizado por Serrano & Balaguera (2006) observamos que son equivalentes. Lo cual comprueba que el programa "Algoritmos de separación G2" es aplicable a cualquier serie de datos de caudal con que se cuente.
- Partiendo de la recesión más fuerte registrada, de noviembre de 2009 a marzo de 2010 (Fenomeno de “El Niño”) alrededor de 120 días, se estimó el caudal aproximado para un evento extremo de cinco (5) meses, utilizando la CMR ajustada mediante la ecuación de Coutagne, arrojando como resultado $0,59\text{m}^3/\text{s}$, lo cual reafirma la calidad de almacenamiento de la cuenca alta del Río de Oro, ya que supera el caudal promedio de funcionamiento de la planta de potabilización la Colina, de la Empresa Piedecuestana de servicios públicos

E.S.P. de $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$. Se encontró también, que utilizar la forma lineal, da resultados poco confiables, $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que subestima la capacidad de almacenamiento de la cuenca, lo cual podría generar mayores inversiones que las realmente necesarias por parte de las empresas prestadoras de servicio.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios con series de datos más prolongados que permitan obtener un mejor análisis de la información, ya que al solo contar con datos entre 2008 y 2011 no hubo suficientes tramos de recesión para construir una CMR más exacta y confiable, además no se pudo establecer de manera segura que en este periodo de tiempo hayan ocurrido las épocas de no lluvia más críticas, necesarias para la estimación de futuros caudales de recesión en la estación Conquistador Alto.
- Si se quieren tomar medidas de prevención para el funcionamiento adecuado de plantas de potabilización o bocatomas, no basta con la estimación realizada en el presente trabajo mediante la CMR, sino además debe realizarse un estudio detallado del caudal ambiental.
- Para lograr una estimación de flujo base con mayor exactitud se hace necesario la aplicación de métodos químicos, como isotopos estables; pues los algoritmos aplicados en el presente estudio llegan a ser muy subjetivos, ya que los coeficientes utilizados quedan a consideración de quien los calibra.
- Para la materia de Hidrología, se recomienda tomar en consideración el programa desarrollado durante el presente trabajo, para que de esta forma se introduzcan los métodos de algoritmos numéricos en el tema de separación de flujo base.

6. BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, John, CABALLERO, Cristian. Calibración e instalación de un CTD Diver en la estación hidrométrica automática del Río de Oro. Tesis de pregrado, 2010.

ARNOLD, J. G., et al. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water*, 1995, Vol 33, N° 6.

APARICIO, Francisco. Fundamentos de Hidrología de superficies. Segunda edición. México: Editorial Limusa, 1992. 19-28 p.

BARLIZA, Ricardo, CRISTANCHO, Efraín. Muestreo de Isotopos estables en la escorrentía total de eventos y otros muestreos complementarios. Tesis de pregrado. 2007.

BRODIE, R, HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs, Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference, Auckland, New Zealand.

BOUGHTON, W. A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments. Hydrology and Water Resources Symposium. Newcastle, 1993. p. 317-324.

CERVANTES, Ronald, FAJARDO, Edwar. Análisis y correlación de la información del CTD en la estación automática del Río de Oro. Tesis de pregrado. 2011.

CHAPMAN, Tom. Effects of ground-water storage and flow on the water balance. *Water Resources, Use and Management*. Melbourne University Press, Canberra, 1963. p. 290–301.

CHAPMAN, Tom, A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*. 1999. Vol 13, p. 701-714.

CHAPMAN, T, MAXWELL, A. Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. *Hydrology and Water Resources. Symposium*. Institution of Engineers Australia, Hobart, 1996. p. 539-545.

CHOW, Ven Te, MAIDMENT, David, MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. Santa fé de Bogotá: McGraw-Hill, 1994.

DÍAZ, Wilfredo., RINCÓN, William. Montaje y calibración de una estación hidrométrica automática para medición de niveles en el Río de Oro. Tesis de pregrado. 2006.

ENGINEERS AUSTRALIA Water Engineering, Australian Rainfall And Runoff Revision project 7: Baseflow for catchment simulation, 2009.

FLÓREZ, Wilmer, RUEDA, José., Curva de calibración y funcionamiento de la estación hidrométrica automática del Río de Oro. Tesis de pregrado. 2009.

FORERO, Juan., Modelo hidrológico distribuido en la cuenca superior del Río de Oro. Tesis de maestría, 2012.

GARZÓN, Lina, NIÑO, Edward. Estudio de curvas de recesión en la cuenca superior del Río Lebrija. Tesis de pregrado. 2003.

GÓMEZ, Sully, GUZMÁN, Jorge. Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 61 pp. 52-63. Diciembre, 2011.

HERNÁNDEZ, Laura, SALTARÍN, Diego. Montaje, operación y calibración de la estación hidrométrica automática para medición de niveles en el Río de Oro, estación Conquistador Alto. Tesis de pregrado. 2007.

HAMMOND, M & Han D, Recession curve estimation for storm event separations, Journal of Hydrology, 2006. Vol. 330, p. 573-585.

HYDROGRAPH SEPARATION Techniques and Recharge in Ireland - Literature Review. 2008.

JAKEMAN, A., HORNBERGER, G. How much complexity is warranted in a Rainfall-Runoff model?. Water Resources Research, 1993. Vol 29, N° 8, p. 2637-2649.

LINSLEY, K., et al. Hydrology for Engineers. London: McGraw-Hill, 1988. 508 p.

LYNE, V. HOLLICK, M. Stochastic time variable rainfall-runoff modelling. Hydrology and Water Resources. Symposium. Institution of Engineers Australia, Perth, 1979. p. 89-92.

MACHUCA, Diana. Separación de flujo base en la Cuenca alta del Río de Oro utilizando algoritmos numéricos. Tesis de pregrado, 2012.

MOORE, R. Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment. Journal of Hydrology, 1997. Vol. 198. p. 260-270.

NATHAN, R, McMAHON, T. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses, Water Resources Research, 1990. Vol 26, p. 1465-1473.

SCHWARZE, R., et al. Regional analysis and modelling of groundwater runoff components from small catchments in solid rock areas, *Landschaftsökol. Umweltforsch.* 1997, Vol 25. p. 59-62.

SERRANO, Adriana, BALAGUERA, Giovanni. Separación de flujo base en la estación Café Madrid (C.S.R.L). Tesis de pregrado. 2006.

SINGH, Krishan, STALL, John. Derivation of base flow recession curves and parameters. *Water Resources Research*, 1971. Vol. 7, No 2.

SMAKHTIN, V., Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 2001. Vol. 240, p. 147-186.

SZILANGYI, Jozsef., PARLANGE, Marc., Baseflow separation based on analytical solutions of the Boussinesq equation. *Journal of Hydrology* 1998. Vol 204, p. 251-260.

TOEBES, C., STRANG, D., On recession curves. 1 - Recession equations. *Journal of Hydrology, New Zealand*, 1964, Vol 3, N° 2, p. 2-15

TALLAKSEN, Lena. A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology* 1995. Vol 165, p. 349-370.

UHLENBROOK, Stefan, et al., Hydrograph separations in a mesoscale mountainous basin at event and seasonal timescales. *Water Resources Research*. 2002. Vol 38, N° 6, doi, 10.1029/2001WR000938.

VÉLEZ, María. Métodos para determinar la recarga en acuíferos. Medellín. Posgrado en Aprovechamiento de recursos hidráulicos. Universidad Nacional.

VISSMAN, W., LEWIS, G. Introduction to hydrology. Pearson Education. 5th edition, 612 p.

WITTENBERG, Hartmut, Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes, *Hydrological Processes*, 1999. Vol 13, p. 715-726.

ANEXOS

Anexo A. Interfaz gráfica “Algoritmos de Separación G2”

