

SEPARACIÓN DE FLUJO BASE Y ESTIMACIÓN DE RECARGA EN RÍOS DE  
MONTAÑA UTILIZANDO ALGORITMOS NUMÉRICOS

VIVIANA LUCÍA GÓMEZ RÍOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA

2014

SEPARACIÓN DE FLUJO BASE Y ESTIMACIÓN DE RECARGA EN RÍOS DE  
MONTAÑA UTILIZANDO ALGORITMOS NUMÉRICOS

VIVIANA LUCÍA GÓMEZ RÍOS

Trabajo de grado para optar el título de  
Ingeniera Civil

Director

SULLY GÓMEZ ISIDRO

Ingeniera Civil, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICOMECAÑICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2014

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora agradece a la directora del grupo de investigación en Predicción y Modelamiento Hidroclimático GPH, Sully Gómez Isidro, por su confianza y dedicación en la realización del este proyecto de grado. A los funcionarios del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB S.A E.S.P., por su amena disposición por contribuir al proceso investigativo de la región y a Dios, que ha actuado a través del amor y fortaleza recibida de mi familia.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1 METODOLOGÍA	14
1.1 CURVA MAESTRA DE RECESIÓN	14
1.2 ALGORITMOS NUMÉRICOS PARA LA SEPARACIÓN DE FLUJO BASE 15	
1.2.1 Algoritmo de separación de un parámetro:	15
1.2.2 Algoritmo de separación de dos parámetros:	16
1.2.3 Algoritmo de separación de tres parámetros:	16
1.2.4 Algoritmo de Nathan & McMahon:	17
1.2.5 Algoritmo de Smakhtin & Watkins:	18
1.3 PROGRAMAS COMPUTACIONALES PARA LA ESTIMACIÓN DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS, MODELO DE RORABAUGH	18
1.3.1 Programa Rora:	20
1.3.2 Programa Pulse:	23
2 RESULTADOS	24
2.1 ZONA DE ESTUDIO	24
2.2 CURVA MAESTRA DE RECESIÓN	26
2.3 SEPARACIÓN DE FLUJO BASE	28

2.3.1	Algoritmo de separación de un parámetro:	28
2.3.2	Algoritmo de separación de dos parámetros:	28
2.3.3	Algoritmo de separación de tres parámetros:	29
2.3.4	Algoritmo de Nathan & McMahon:	30
2.3.5	Algoritmo de Smakhtin & Watkins:	30
2.4	ESTIMACIÓN DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA	32
3	DISCUSIÓN	36
4	CONCLUSIONES	40
	CITAS	42
	BIBLIOGRAFIA	44

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación de las variables en el modelo de Rorabough	19
Figura 2. Hidrograma esquemático del procedimiento ejecutado para cada pico en el método del desplazamiento de la curva de recesión	20
Figura 3. Diagrama de flujo del procedimiento interno del programa Rora	22
Figura 4. Cauces de la cuenca superior del río Lebrija y delimitación de las cuencas del río Suratá (azul) y de Oro (naranja)	25
Figura 5. Épocas de recesión representativas, río Suratá	26
Figura 6. Ajuste a la forma lineal de la CMR. Río Suratá	27
Figura 7. Ajuste a la forma no lineal de la CMR. Río Suratá	27
Figura 8. Algoritmo de un parámetro, temporada de recesión tipo	28
Figura 9. <i>Algoritmo de dos parámetros, temporada de recesión tipo</i>	29
Figura 10. Algoritmo de tres parámetros, temporada de recesión tipo.	29
Figura 11. Algoritmo de Nathan & McMahon, temporada de recesión tipo	30
Figura 12. Algoritmo de Smakhtin & Watkins, temporada de recesión tipo	31

Figura 13. Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación. Río de Oro 2009	32
Figura 14. Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación. Río de Oro 2010	33
Figura 15. Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación. Río Suratá 2009	33
Figura 16. Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación. Río Suratá 2010	34
Figura 17. Hidrograma de separación de flujo base construido por Pulse para la cuenca del río Suratá entre 2009 y 2010	34
Figura 18. Modelo conceptual propuesto para la cuenca del río Suratá	37

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones utilizadas. ▼ Estación limnigráfica. ▴ Estación pluviométrica	24
Tabla 2. Parámetros y resultados de la separación de flujo base en el rio Surata y rio de Oro.	31
Tabla 3. Porcentaje de recarga anual respecto a la precipitación anual acumulada en [mm] de la cuenca del Río de Oro	35
Tabla 4. Porcentaje de recarga anual respecto a la precipitación anual acumulada en [mm] de la cuenca del río Suratá	35

## RESUMEN

### TÍTULO:

SEPARACIÓN DE FLUJO BASE Y ESTIMACIÓN DE RECARGA EN RÍOS DE MONTAÑA UTILIZANDO ALGORITMOS NUMÉRICOS<sup>1</sup>

### AUTOR:

GÓMEZ RÍOS, Viviana Lucía<sup>2</sup>

### PALABRAS CLAVE:

No linealidad en el flujo subterráneo, separación de flujo base, estimación de recarga, modelo conceptual de flujo.

### DESCRIPCIÓN:

Los almacenamientos hídricos subterráneos proveen de agua a las corrientes superficiales principalmente en temporadas de precipitaciones nulas. Aunque las interacciones entre el flujo de entrada y el flujo de salida en acuíferos son complejas, los algoritmos numéricos de estimación de recarga y descarga de agua subterránea brindan un primer acercamiento a estos procesos hidrogeológicos.

En el proyecto se analizaron las temporadas de recesión de caudales utilizando la curva maestra de recesión como prerrequisito para separar el flujo base del flujo total y estimar la recarga en acuíferos, usando series de tiempos de caudales de la cuenca del río Suratá y la cuenca superior del Río de Oro, las cuales desembocan en el río Lebrija (Santander, Colombia). Los algoritmos numéricos desarrollados en el programa G2 [1] fueron empleados para la separación del flujo base, mientras que la estimación de recarga se hizo por medio de los programas Rora y Pulse, del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

La curva maestra de recesión muestra la no linealidad del flujo subterráneo en las cuencas, así como permitió la elaboración de un modelo conceptual de flujo bajo los parámetros de Wittenberg. Por su parte, el algoritmo de separación de flujo base que mejor se ajustó a la forma del hidrograma fue el algoritmo de tres parámetros. Finalmente, se presenta la estimación de recarga mensual y anual entre los años 2009 y 2010 con los programas Rora y Pulse para ambas cuencas.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD. Sully Gómez Isidro.

## ABSTRACT

### TÍTULO:

BASE FLOW SEPARATION AND RECHARGE ESTIMATION IN HIGH MOUNTAIN BASINS USING NUMERICAL ALGORITHMS<sup>1</sup>

### AUTHOR:

GÓMEZ RÍOS, Viviana Lucía<sup>2</sup>

### KEYWORDS:

Nonlinearity in underground flow, base flow separation, recharge estimation, conceptual flow model.

### DESCRIPTION:

Groundwater storage provides water to the ground surface mainly during dry seasons. Although the interaction between the inflow and outflow in aquifers is complex, the numerical algorithms to estimate the recharge and discharge of water from aquifers provide a good assessment of these hydrogeological processes.

In this study, multiple seasons of flow recession were analyzed using a master recession curve as a pre-requisite to separate the base flow from the total flow and to estimate aquifers recharge. The calculations were based on flow time series of the Surata's River basin and the Oro's River basin, from which water flows into the Lebrija River (Santander, Colombia). Base flow of these river basins were calculated using the numerical algorithms developed on the G2 software [1]. The aquifers recharge was predicted using numerical algorithms programmed on Rora and Pulse of the *United States Geological Survey* (USGS).

The master recession curve demonstrated the nonlinearity of groundwater flow at the basins and allowed to create the conceptual flow model based on Wittenberg's parameters. In addition, the model that best fits the hydrograph was a base flow separation algorithm of three-parameters. Finally, monthly and annual recharges for both basins were estimated from 2009 up to 2010 using the Rora and Pulse programs.

---

<sup>1</sup> Bachelor Thesis

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: PhD. Sully Gómez Isidro.

## INTRODUCCIÓN

Los almacenamientos hídricos subterráneos proveen de agua a las corrientes de los ríos en temporadas de precipitaciones bajas o nulas; además, abastecen regiones secas, por lo general, con agua natural libre de patógenos, cuyo color y turbiedad la hacen apta para el consumo directo. En consecuencia, la estimación del flujo de entrada y el flujo de salida de los acuíferos permite acercarse a un valor numérico de la capacidad de almacenamiento subterráneo, al tiempo que aporta al reconocimiento de las interacciones hidrogeológicas acuífero – corriente.

En este trabajo se analizaron registros de caudales del río Suratá, una de las principales fuentes hídricas de Santander, que abastece de agua potable, con la administración y regulación del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB S.A. E.S.P, algunos sectores de Bucaramanga, Floridablanca y Girón. Conjuntamente, se empleó información del Río de Oro, tratada en [1], para validar los resultados de estimación de recarga de agua subterránea y separación de flujo base, y se complementó con la propuesta de un modelo conceptual de flujo.

En el primer capítulo se presentan las ecuaciones para la interpretación de la curva maestra de recesión, cinco algoritmos numéricos usados en el programa G2 para la separación de flujo base, y los métodos de estimación de recarga en acuíferos basados en las ecuaciones de Rorabaugh: Rora y Pulse. El segundo capítulo recoge los resultados: análisis de la información hidrométrica, elaboración de la curva maestra de recesión y los resultados de la aplicación de los programas mencionados para la separación de flujo base y estimación de recarga. Finalmente, en la sección de discusión, se propuso un modelo conceptual de flujo subterráneo característico para las cuencas.

# 1 METODOLOGÍA

## 1.1 CURVA MAESTRA DE RECESIÓN

La curva maestra de recesión (CMR) representa los periodos de estiaje en una serie de tiempo de caudales cuando todo el flujo proviene de la descarga (el agua subterránea drena a la corriente); cuando no ocurre recarga (el agua superficial no contribuye al flujo subterráneo) y cuando el perfil de distribución de la cabeza de agua subterránea es cercano a ser estable [2]. Asimismo, la CMR es el resultado de la superposición de las curvas de recesión (temporadas de recesión) del hidrograma. Una de las expresiones analíticas empleadas para describir matemáticamente una CMR es la ecuación de Coutagne, usada en [3], en la cual se considera la descarga de agua subterránea como una función continua correspondiente al drenaje de un único reservorio, así:

$$S = aQ^b \quad (1)$$

Donde  $Q$  es el caudal en temporadas de recesión;  $S$  es el volumen de almacenamiento disponible a ser descargado en la corriente;  $b$  es una constante adimensional y  $a$  es otra constante cuya unidad de medida es  $m^{3-3b}s^b$  si el almacenamiento es dado en  $m^3$  y el caudal en  $m^3/s$ . La derivada del almacenamiento respecto al tiempo en la ecuación (1) representa la descarga  $Q_t$  en cualquier tiempo  $t$  de curva maestra de recesión. Cuando  $b = 1$  el flujo subterráneo se considera lineal. La solución de esta ecuación diferencial para valores de  $b$  diferentes a 1 es:

$$Q_t = Q_o \left[ 1 + \frac{(1-b)Q_o^{1-b}}{ab} t \right]^{\frac{1}{b-1}} \quad (2)$$

Donde  $Q_0$  es el caudal inicial ( $t = 0$ ) de la curva maestra de recesión. Igualmente, en [3] los valores de la constante  $b$  se interpretan en términos de convergencia del flujo en el sistema de agua subterránea, mientras que los de  $a$  se relacionan con la porosidad, la conductividad hidráulica y con las propiedades morfométricas.

## **1.2 ALGORITMOS NUMÉRICOS PARA LA SEPARACIÓN DE FLUJO BASE**

El flujo base es el flujo sostenido de un arroyo en ausencia de la escorrentía directa; proviene principalmente del agua subterránea de los acuíferos en contacto y por lo tanto, es un índice del agua almacenada y de la sostenibilidad del recurso hídrico. Los métodos para la separación de flujo base se clasifican principalmente en gráficos, químicos (trazadores isotópicos) y los basados en algoritmos numéricos, que usan la curva de recesión de series de tiempo de caudales. En un estudio hidrológico detallado, conviene contrastar los resultados de cada uno de los métodos de separación.

Los algoritmos numéricos basados en curva de recesión 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 [4]. A continuación, se describen los cinco algoritmos usados para la separación de flujo base desarrollados en el programa G2 [1].

### **1.2.1 Algoritmo de separación de un parámetro:**

En el primer filtro digital para la separación de flujo base, la forma del filtro implicaba que el flujo base sería constante cuando no había escorrentía directa [5]. Esta escorrentía era la suma de una porción de la escorrentía en el tiempo  $(i - 1)$  más la diferencia de caudales entre el tiempo  $(i)$  y el  $(i - 1)$ . A partir de esta hipótesis, Chapman y Maxwell [6] formularon la ecuación (3) en la cual el flujo

base es un promedio ponderado entre el escurrimiento directo y el flujo base en el intervalo de tiempo anterior, condicionada por  $Q_b(i) \leq Q(i)$ :

$$Q_b(i) = \frac{k}{2-k} Q_b(i-1) + \frac{1-k}{2-k} Q(i) \quad (3)$$

Donde  $k$  en unidades de  $[T^{-1}]$ , es la constante de recesión, también llamado índice de recesión o pendiente de la línea tangente a la curva maestra de recesión, cuyo inverso puede ser interpretado como el tiempo promedio en el que permanece una gota de agua que ingresa al acuífero, y el parámetro  $Q_b$  es el flujo base en el intervalo de tiempo  $(i)$ .

### 1.2.2 Algoritmo de separación de dos parámetros:

El algoritmo de separación de dos parámetros fue planteado en [7] para darle mayor flexibilidad a la ecuación (3). La constante  $C$  indica la respuesta rápida del flujo y es hallada, de forma subjetiva por el usuario, en la inspección de la forma del flujo al final de la escorrentía, particularmente para grandes eventos de precipitación, limitada por  $Q_b(i) \leq Q(i)$ :

$$Q_b(i) = \frac{k}{1+k} Q_b(i-1) + \frac{C}{1+C} Q(i) \quad (4)$$

### 1.2.3 Algoritmo de separación de tres parámetros:

Conocido también como método de IHACRES desarrollado en [8], indica que la respuesta de un evento de lluvia-escorrentía es bien representado usando un modelo lineal en el cual el exceso de lluvia es separado en dos componentes: flujo rápido y flujo lento. Esta es una configuración flexible de almacenamientos lineales conectados en caminos en paralelo o en serie para el tránsito de exceso de lluvia a las corrientes. El método de IHACRES fue simplificado como se muestra en la

ecuación (5), considerando el exceso de lluvia como la diferencia entre el caudal base y el caudal total:

$$Q_{b(i)} = \frac{k}{1+C} Q_{b(i-1)} + \frac{C}{1+C} [Q_{(i)} + \alpha_q Q_{(i-1)}]$$

$$C = \frac{\beta_s}{\beta_q} ; k = -\alpha_s - \alpha_q \frac{\beta_s}{\beta_q} \quad (5)$$

Donde  $\beta$  y  $\alpha$  son parámetros y los sufijos  $q$  y  $s$  hacen referencia al flujo lento y al flujo rápido respectivamente. Los valores de  $\alpha$  son negativos y describen la tasa de decrecimiento del hidrograma mediante una unidad de entrada de exceso de lluvias; los parámetros  $\beta$  definen el pico del componente del hidrograma.

#### 1.2.4 Algoritmo de Nathan & McMahon:

Este algoritmo proporciona una buena estimación de la escorrentía superficial aunque no tiene base física real. La constante de recesión es reemplazada por el parámetro  $\beta = 0,925$  que se ajusta muy bien a series diarias de caudales. El caudal base es la diferencia entre el caudal total  $Q$  y la escorrentía directa  $Q_d$ :

$$Q_{d(i)} = \beta Q_{d(i-1)} + \frac{1+\beta}{2} [Q_{(i)} - Q_{(i-1)}] \quad (6)$$

El filtro pasa tres veces por los datos de caudal (hacia delante, hacia atrás y de nuevo hacia adelante) con lo que se obtienen tres porcentajes de caudal base. Cada pasada se traduce en menos flujo base como porcentaje del flujo total debido a que cada paso se basa en los resultados del anterior.

### 1.2.5 Algoritmo de Smakhtin & Watkins:

Es una expresión para hallar escorrentía directa. El flujo base, por su parte, se establece por medio de la diferencia entre el caudal total y la escorrentía obtenida en esta ecuación:

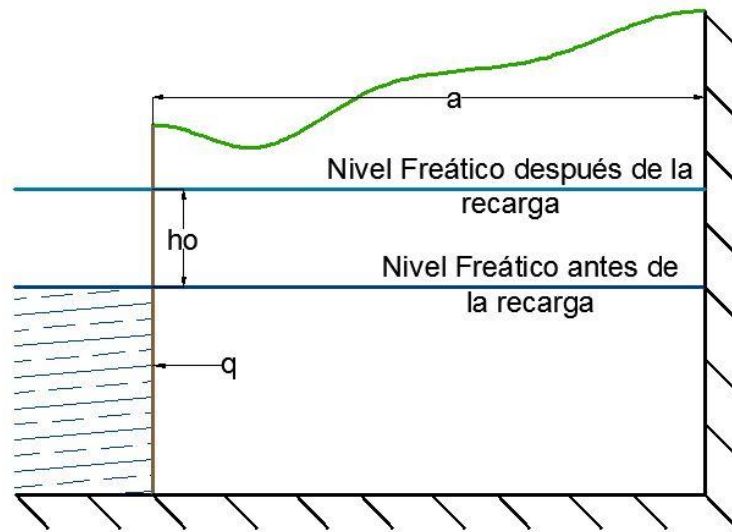
$$q_{(i)} = \alpha q_{(i-1)} + \beta [1 + \alpha] [Q_{(i)} - Q_{(i-1)}]$$
$$Q_{b(i)} = Q_{(i)} - q_{(i)} \quad (7)$$

## 1.3 PROGRAMAS COMPUTACIONALES PARA LA ESTIMACIÓN DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS, MODELO DE RORABAUGH

Recarga es la entrada de agua hacia la zona saturada o nivel freático donde comienza a ser parte de las reservas subterráneas; esta entrada puede darse de dos maneras: por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad o luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo [9].

La base teórica usada por Rorabaugh proviene del campo del flujo del calor y la electricidad [10]. Este modelo describe un acuífero ideal constante en ancho, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento; además, asume que el flujo cubre completamente el acuífero y que la cabeza hidráulica es la misma en cualquier lugar. Así, la recarga es un incremento instantáneo en la cabeza hidráulica  $h_o$  aplicado uniformemente, mientras que el nivel de la corriente se mantiene sin cambios [2] (ver Figura 1).

**Figura 1.** Representación de las variables en el modelo de Rorabough



Fuente: [11] modificada.

En el modelo, aparte de los fenómenos de recarga y descarga, no se presentan otros que permitan ganar o perder agua del sistema (subestima los efectos de la evapotranspiración). La ecuación planteada originalmente por Rorabough en función de  $q$ , descarga de agua subterránea por unidad de longitud;  $T$ , transmisividad;  $S$ , coeficiente de almacenamiento y  $h_o$  fue modificada en [11] en términos de parámetros más sencillos de encontrar por el usuario, así, la descarga de agua subterránea se expresa matemáticamente como:

$$Q = \frac{1.866 AR_i}{k} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} e^{-0.933m^2\pi^2\frac{t}{4k}} \quad (8)$$

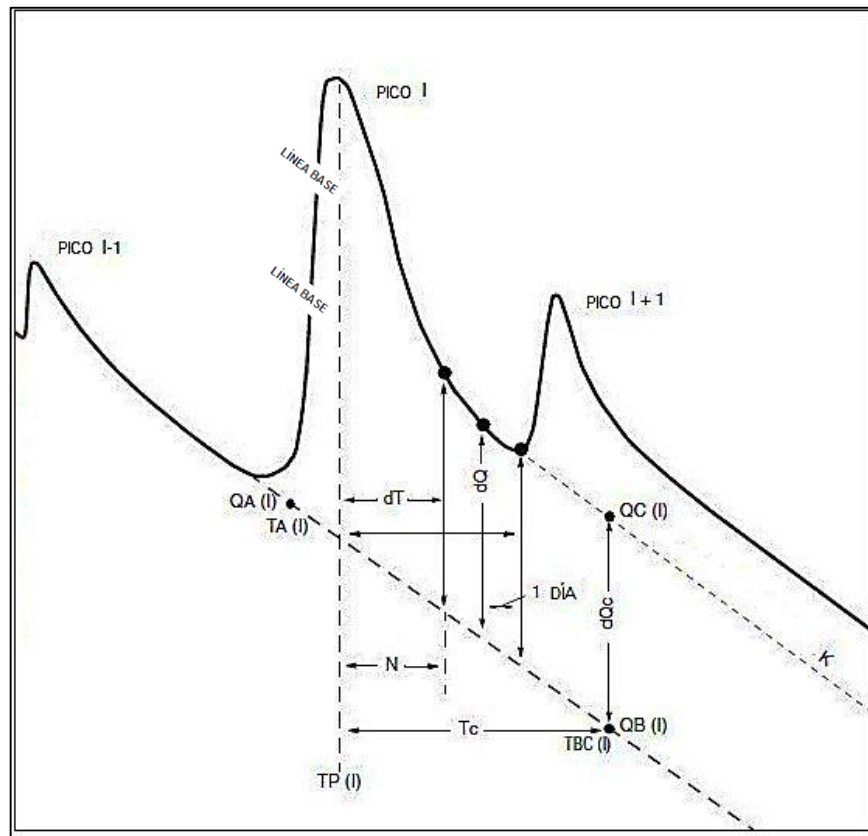
Donde  $Q$  es la descarga total de agua subterránea en la cuenca [ $L^3/T$ ];  $A$  es el área de drenaje de la cuenca;  $R_i$  es la recarga instantánea en unidades de longitud y  $k$  es la constante de recesión [ $T^{-1}$ ].

Los programas Rora y Pulse, estiman la recarga mensual y anual en acuíferos con registros diarios de caudales con la limitación de que el programa Pulse no fue diseñado para registros superiores a dos años.

### 1.3.1 Programa Rora:

Rora es un software gratuito desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para estimar la recarga de agua subterránea a través del método de Rorabaugh o de medición del desplazamiento de la curva maestra de recesión resultante de cada evento de precipitación. El procedimiento realizado por el programa se muestra en la Figura 2 y se describe en la Figura 3.

**Figura 2.** Hidrograma esquemático del procedimiento ejecutado para cada pico en el método del desplazamiento de la curva de recesión



Fuente: [2], modificado.

Después de un evento de recarga apreciable, debe transcurrir un cierto intervalo de tiempo antes de que se puede observar una recesión lineal. Esto se conoce como *tiempo crítico*, que se puede determinar a partir de la siguiente ecuación empírica:

$$t_c = 0.2144 k \quad (9)$$

Tras del evento de recarga instantánea, con el resultado de la descarga de agua subterránea  $Q$  de la ecuación (8) la recarga se puede estimar de la siguiente manera:

$$R \cong \frac{2Qk}{2.3026} \quad (10)$$

El programa también puede hacer cálculos para determinar si existe descarga de agua subterránea a la corriente como resultado de eventos de recarga previos. Esto se logra mediante la definición de una "línea de base" de descarga de aguas subterráneas como consecuencia de la recarga anterior. Esta línea de base de pendiente  $k$  (constante de recesión) se describe matemáticamente dentro del programa como se muestra en la Figura 2.

La descarga resultante del evento de interés será aproximadamente proporcional al recíproco de la raíz cuadrada del tiempo desde el evento de recarga. Para cada evento de recarga, la descarga de agua subterránea resultante del evento puede ser en consecuencia descrita por la siguiente ecuación:

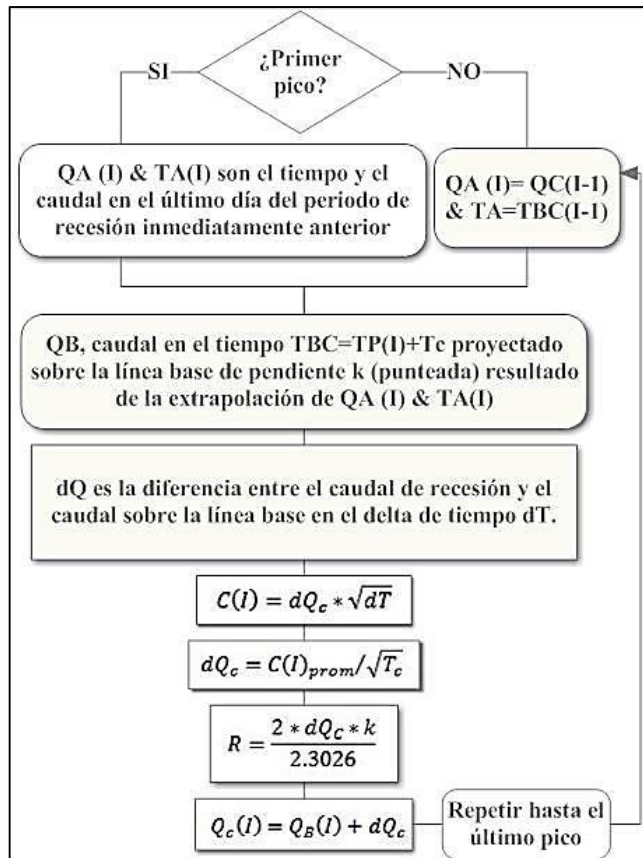
$$Q \cong \frac{C_e}{\sqrt{t}} \quad (11)$$

Donde  $C_e$  es una constante para cada evento de precipitación. Asimismo, la duración de tiempo después de un pico de caudal en el que los componentes del caudal debido a la escorrentía superficial y subsuperficial son significativos, se puede estimar en la siguiente relación empírica [11]:

$$N = A^{0.2} \quad (12)$$

En donde  $N$  es el tiempo en días después de un pico de recarga y  $A$  es el área de drenaje en millas cuadradas. El programa usa esta ecuación para determinar el valor por defecto de la exigencia de la recesión antecedente, y toma los picos con la presunción de durante este tiempo ocurren los eventos de recarga.

**Figura 3.** Diagrama de flujo del procedimiento interno del programa Rora



Fuente: [2], modificado.

### **1.3.2 Programa Pulse:**

A diferencia del programa Rora, Pulse calcula un hidrograma de descarga de agua subterránea siguiendo un pulso instantáneo de recarga a la corriente. Así mismo, el usuario puede modificar numéricamente la recarga para adaptarla al comportamiento no lineal del hidrograma y para ajustar el hidrograma de separación a los efectos provocados por pérdidas como la evapotranspiración.

## 2 RESULTADOS

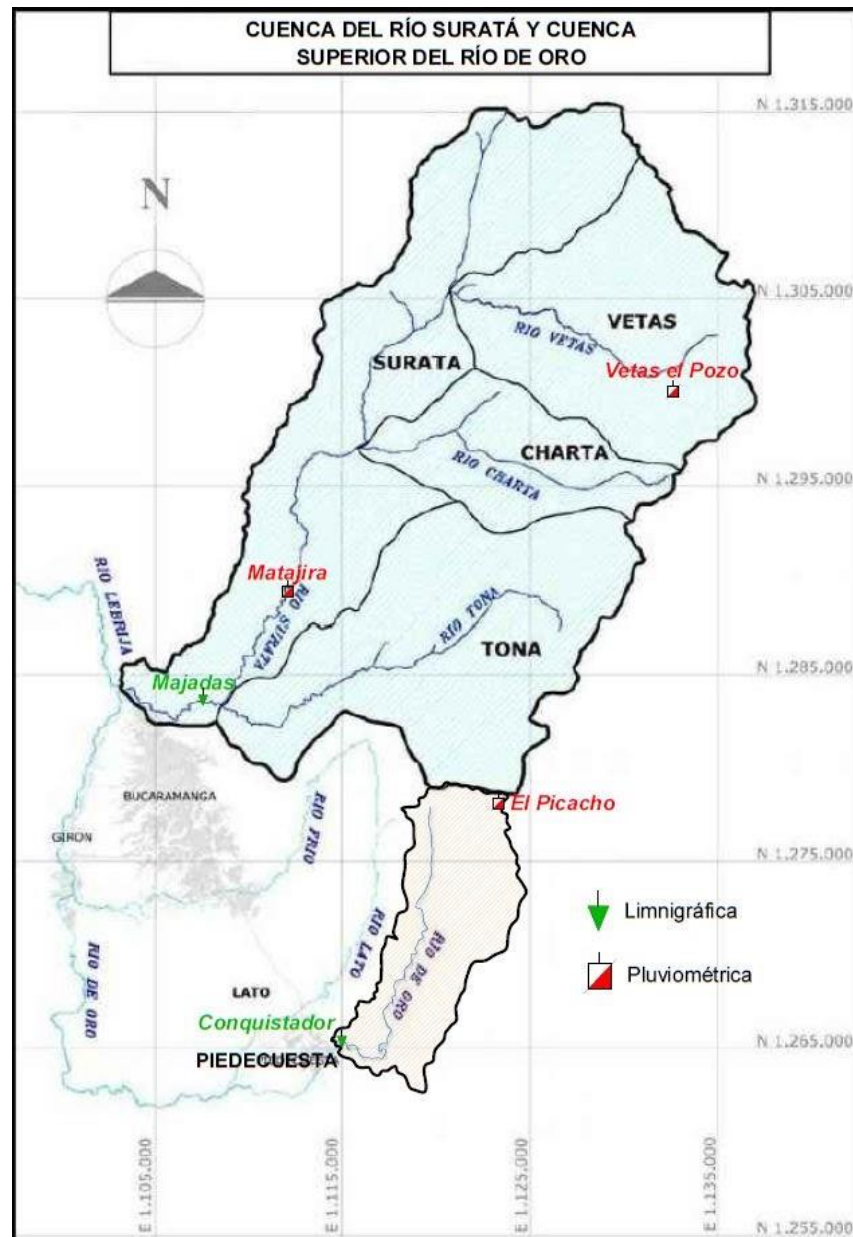
### 2.1 ZONA DE ESTUDIO

Se analizó información hidroclimática de la cuenca del río Suratá (alimentada por los cauces de los ríos Tona, Charta y Vetas) y de la cuenca superior del Río de Oro. Estas corrientes, que pertenecen a la cuenca superior del río Lebrija, surten de agua a Bucaramanga, su área metropolitana y otros municipios del departamento de Santander. La información de lluvias y caudales utilizada proviene de las estaciones hidroclimáticas registradas en la Tabla 1 y en la Figura 4.

**Tabla 1.** Estaciones utilizadas. ▼ Estación limnigráfica. ▣ Estación pluviométrica

ESTACIÓN	TIPO	ALTITUD [msnm]	PERIODO DE MEDICIÓN
Majadas	▼	700	01/01/1990 31/10/2013
Conquistador Alto	▼	1105	02/10/2008 31/03/2011
Matajira	▣	996	01/01/1982 31/07/2004
Vetas el Pozo	▣	3220	01/01/1993 31/12/2013
El Picacho	▣	3310	01/01/1993 31/12/2013

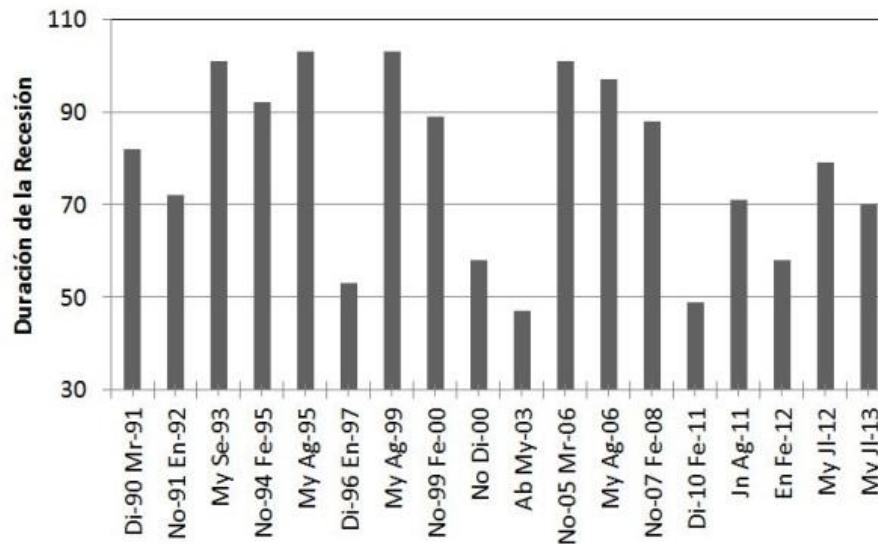
**Figura 4.** Cauces de la cuenca superior del río Lebrija y delimitación de las cuencas del río Suratá (azul) y de Oro (naranja)



Fuente [12] modificada.

El análisis de la información de la estación limnigráfica Majadas (1990-2013) permitió identificar (18) dieciocho periodos de recesión, como se muestra en Figura 5. Con estos periodos se construye la CMR de las figuras 6 a 8.

**Figura 5.** Épocas de recesión representativas, río Suratá

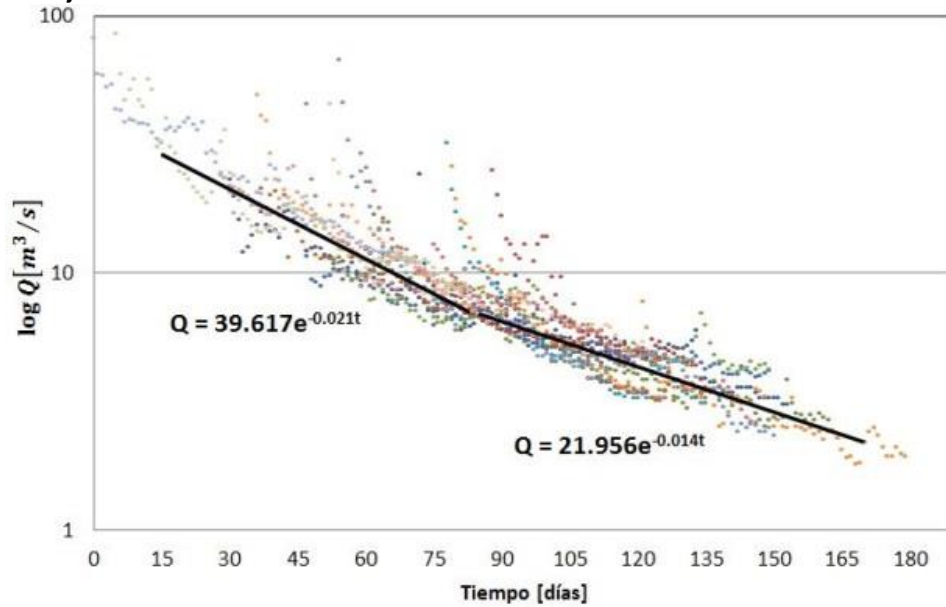


## 2.2 CURVA MAESTRA DE RECESIÓN

La serie de tiempo de caudales en ríos de alta montaña se caracteriza por presentar, durante las temporadas de recesión, pequeñas lloviznas que no logran afectar significativamente el comportamiento exponencial del hidrograma en estas temporadas, por lo tanto, se descartaron en la elaboración de la CMR.

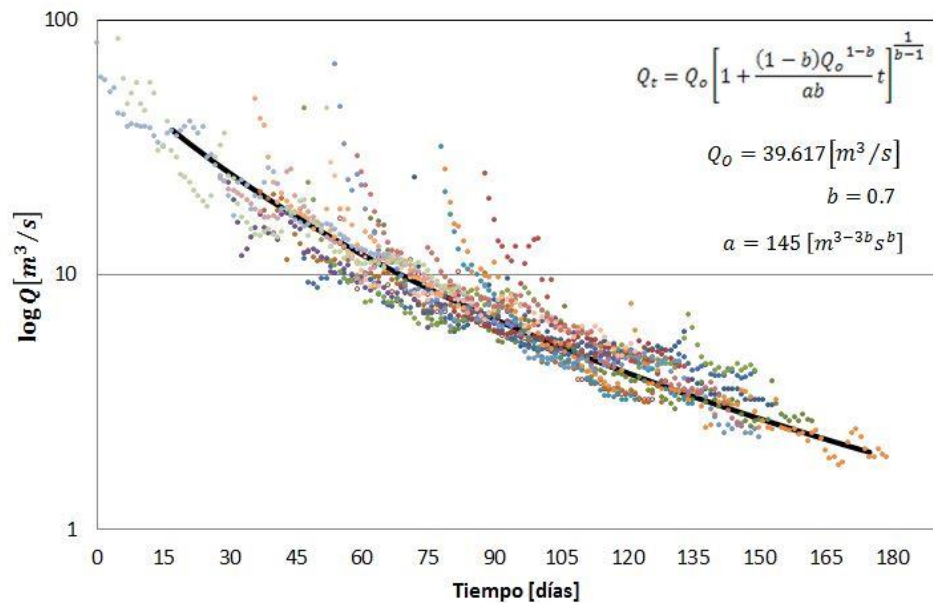
El ajuste lineal de la curva maestra de recesión del río Suratá a la ecuación (1) se muestra en la Figura 6. No se distingue una tendencia lineal única de flujo; sin embargo, se observa que el comportamiento de las épocas de estiaje con duraciones menores se acerca más a la línea de tendencia con pendiente mayor, mientras que recesiones más prolongadas se relacionan con la menor. Las constantes de recesión que mejor se ajustan a la forma de la curva son:  $\alpha_1 = 0.021 [días^{-1}]$  y  $\alpha_2 = 0.014 [días^{-1}]$

**Figura 6.** Ajuste a la forma lineal de la CMR. Río Suratá



La ecuación (2) fue ajustada a las épocas de recesión, como se muestra en la Figura 7 con los parámetros  $a = 145$  y  $b = 0.7$ . Con ello se identifica la no linealidad en el flujo subterráneo del acuífero.

**Figura 7.** Ajuste a la forma no lineal de la CMR. Río Suratá

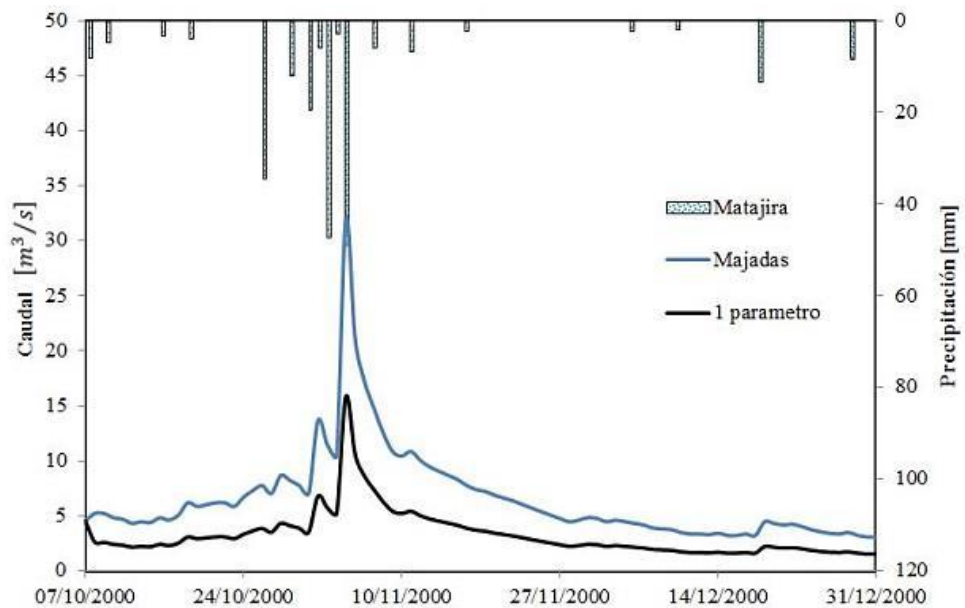


## 2.3 SEPARACIÓN DE FLUJO BASE

### 2.3.1 Algoritmo de separación de un parámetro:

Para la separación de flujo base a través del algoritmo de un parámetro se usaron tres diferentes constantes de recesión: los dos hallados en la Figura 6 y el valor promedio entre estas constantes  $k = 0,0175 \text{ [días}^{-1}\text{]}$ .

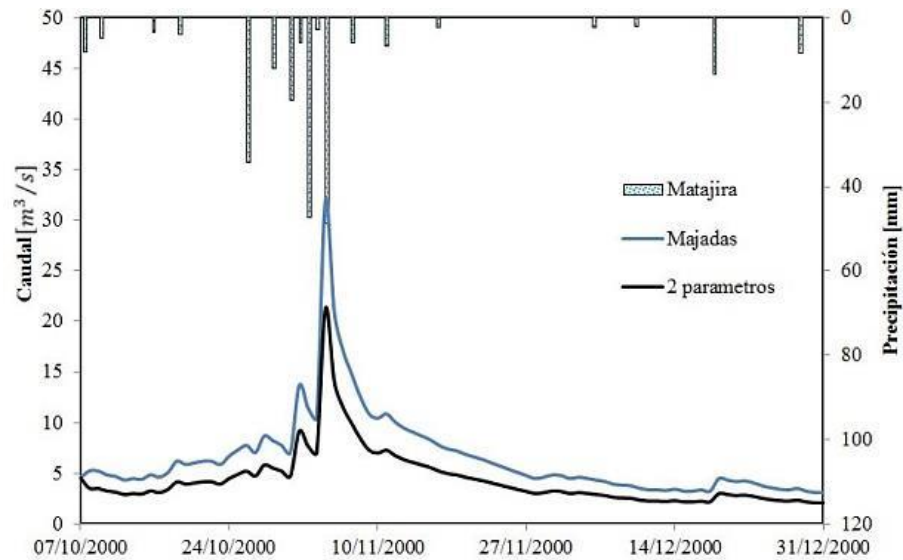
**Figura 8.** Algoritmo de un parámetro, temporada de recesión tipo



### 2.3.2 Algoritmo de separación de dos parámetros:

Se escogió el valor de  $C = 2$  aunque es un valor que sobrestima el caudal base en eventos de precipitación y lo subestima en los periodos de estiaje.

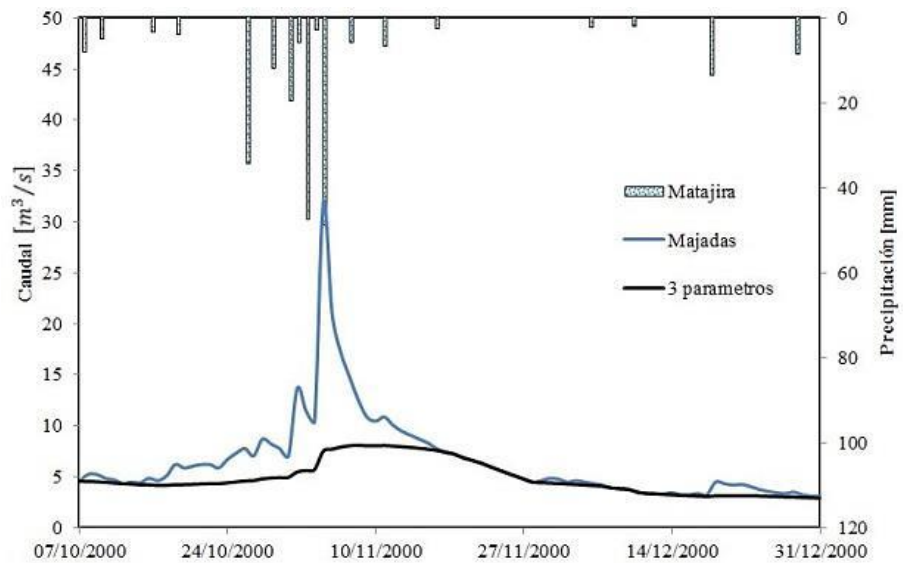
**Figura 9.** Algoritmo de dos parámetros, temporada de recesión tipo



### 2.3.3 Algoritmo de separación de tres parámetros:

Este es el método que mejor se ajusta a la forma del hidrograma, no obstante, el porcentaje de flujo base depende de los parámetros seleccionados de forma subjetiva así:  $\alpha_s = -0,985$ ;  $\alpha_q = -0,4$ ;  $\beta_s = 1,5$ ;  $\beta_q = 18$ .

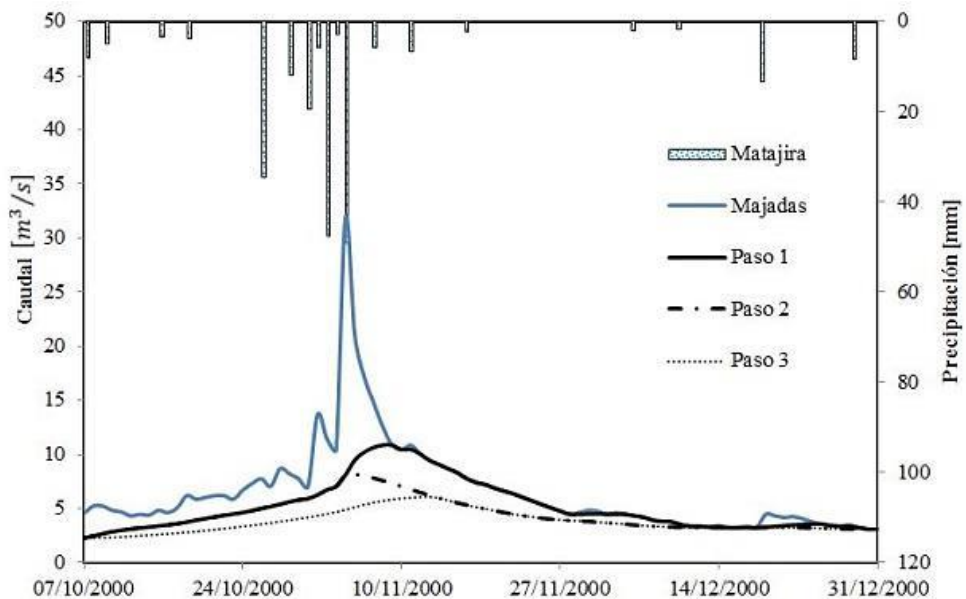
**Figura 10.** Algoritmo de tres parámetros, temporada de recesión tipo.



### 2.3.4 Algoritmo de Nathan & McMahon:

Este algoritmo de separación brinda tres opciones, siendo el paso 1 el que mejor se acopla a la forma del hidrograma. Sin embargo, aunque en el paso 2 el máximo caudal de separación se muestra en un tiempo previo al pico del hidrograma, la estimación numérica de flujo base se acerca más al promedio del porcentaje del caudal base de todos los algoritmos.

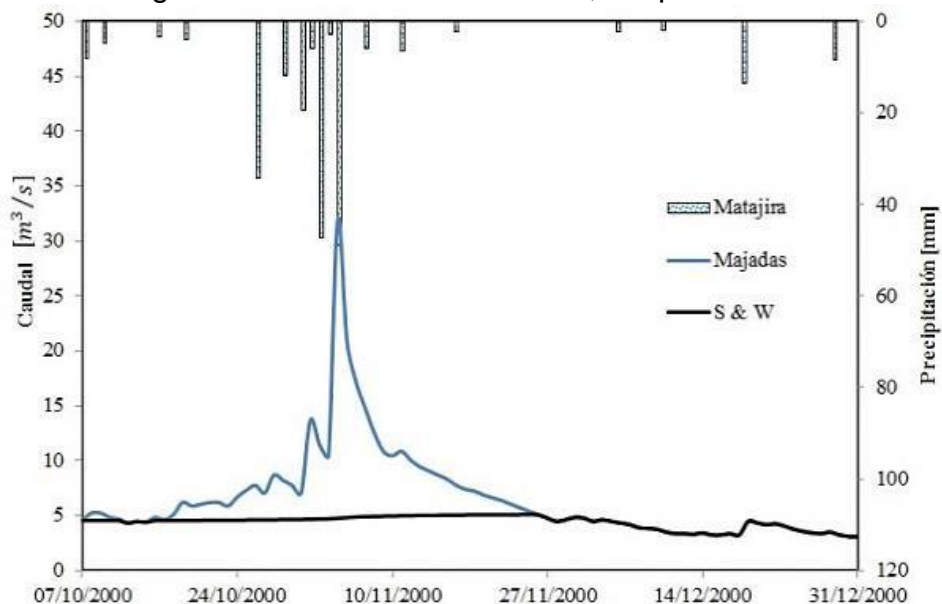
**Figura 11.** Algoritmo de Nathan & McMahon, temporada de recesión tipo



### 2.3.5 Algoritmo de Smakhtin & Watkins:

Los resultados no muestran ningún cambio significativo en los días de caudales máximos. El alto porcentaje de flujo base respecto al caudal total (73%), es consecuencia de que la estimación de flujo base permanece aproximadamente constante en toda la serie de tiempo.

**Figura 12.** Algoritmo de Smakhtin & Watkins, temporada de recesión tipo



En la Tabla 2 se presentan los resultados de la separación del flujo base del flujo total en los periodos de tiempo señalados en la Tabla 1 tanto para la cuenca del río Surata como para la cuenca del Río de Oro, cuyo análisis de recesión fue realizado en [1].

**Tabla 2.** Parámetros y resultados de la separación de flujo base en el río Surata y río de Oro.

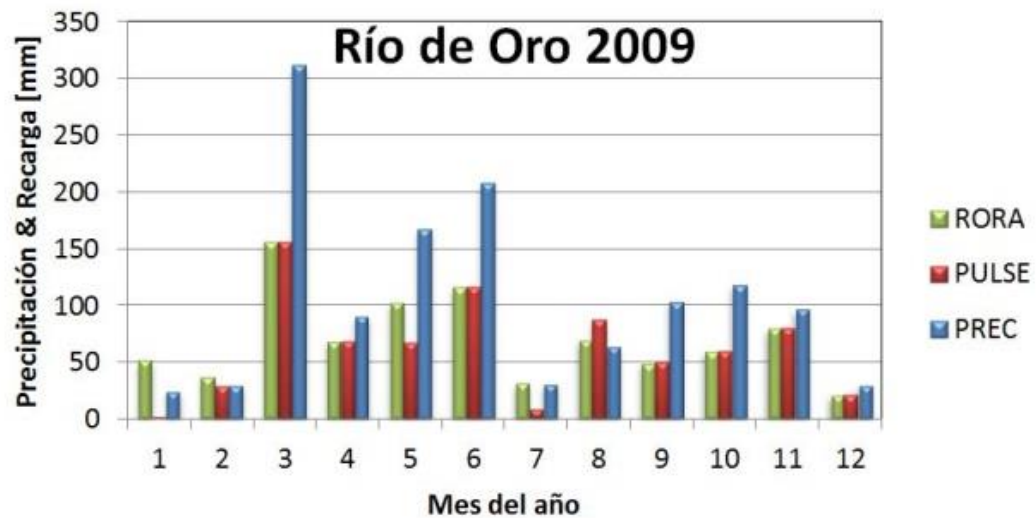
Método	Parámetro	Río Suratá		Río de Oro	
		-	% $Q_b$	-	% $Q_b$
1-P	$k$	0,0175	50,4	0,0063	50,1
2-P	$C$	2	67,3	2,5	71,6
3-P	$\alpha_q$	-0,4	69,2	-0,12	81,0
	$\alpha_s$	-0,985		-0,98	
	$\beta_q$	18		4	
	$\beta_s$	1,5		0,6	

Método	Parámetro	Río Suratá		Río de Oro	
		-	% $Q_b$	-	% $Q_b$
N&Mc	$\beta$	0,925	78,2	0,925	80,5
			68,3		73,4
			62,5		69,4
S&W	$\alpha$	0,997	73,1	0,997	78,8
	$\beta$	0,5		0,5	
			67,0	72,1	

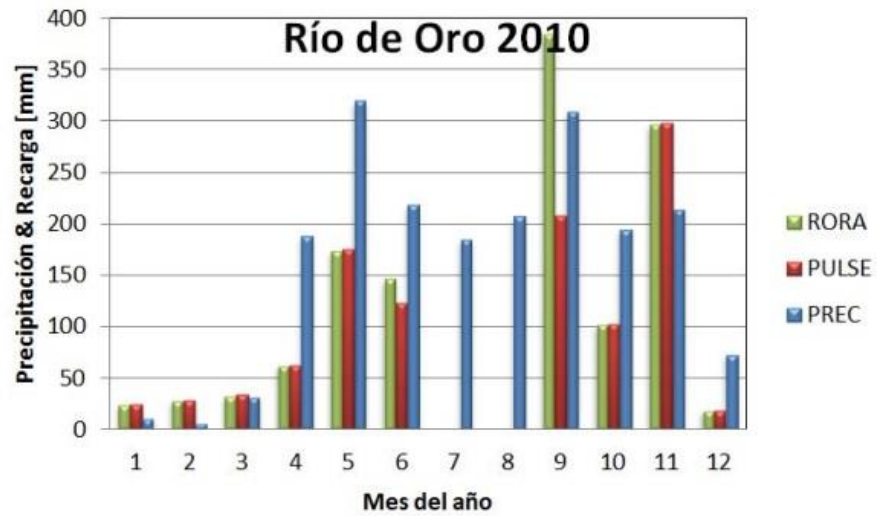
## 2.4 ESTIMACIÓN DE RECARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA

La estimación de recarga con los programas Rora y Pulse para los ríos Suratá y de Oro, fue hecha únicamente para los años 2009 y 2010 ya que la estación Conquistador sobre el Río de Oro solo tiene información en dicho periodo de tiempo.

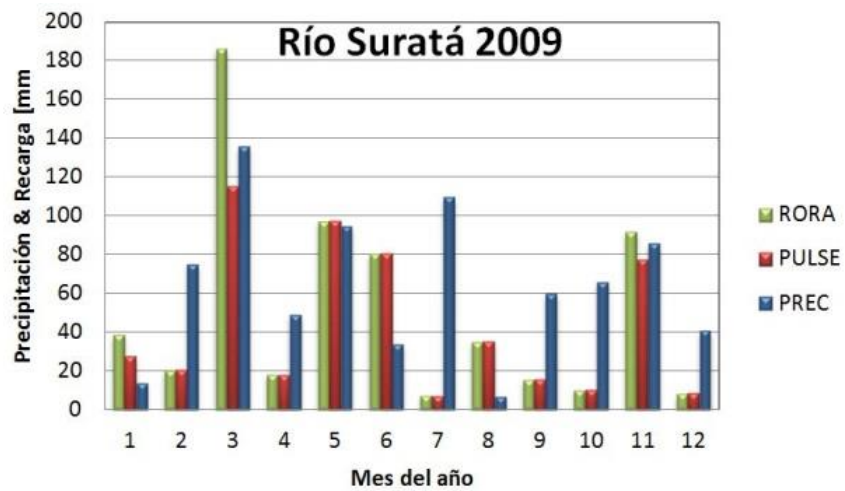
**Figura 13.** Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación. Río de Oro 2009



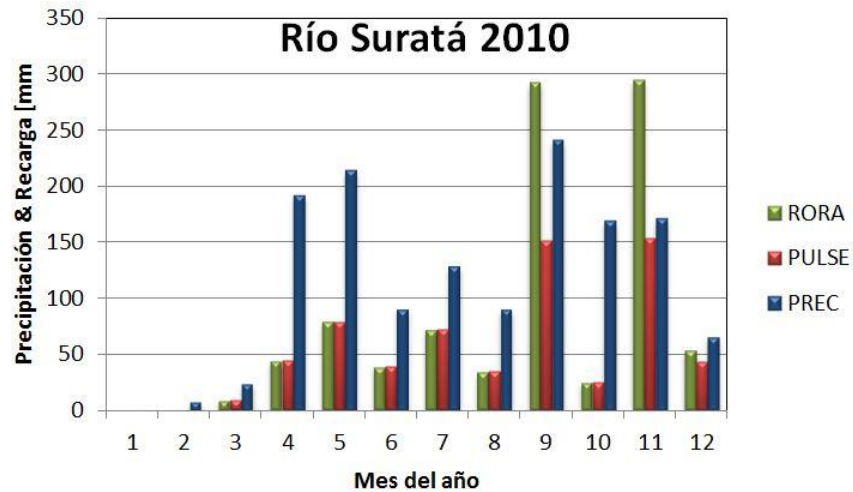
**Figura 14.** Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación.  
Río de Oro 2010



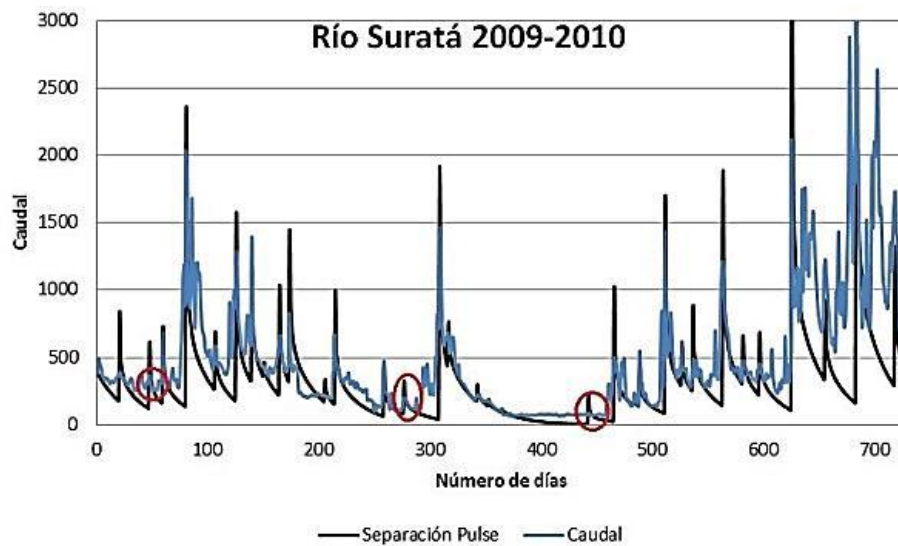
**Figura 15.** Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación.  
Río Suratá 2009



**Figura 16.** Comparación de los valores estimados de recarga y la precipitación. Río Suratá 2010



**Figura 17.** Hidrograma de separación de flujo base construido por Pulse para la cuenca del río Suratá entre 2009 y 2010



Asimismo, en las tablas 3 y 4 se presentan los valores estimados de recarga acumulada anual como porcentajes de la precipitación media anual.

**Tabla 3.** Porcentaje de recarga anual respecto a la precipitación anual acumulada en [mm] de la cuenca del Río de Oro

	<b>2009</b>		<b>2010</b>	
Precipitación	1286,3	%	1955,5	%
Rora	819,7	63,7	1167,2	59,7
Pulse	750,1	58,3	1070,4	54,7

**Tabla 4.** Porcentaje de recarga anual respecto a la precipitación anual acumulada en [mm] de la cuenca del río Suratá

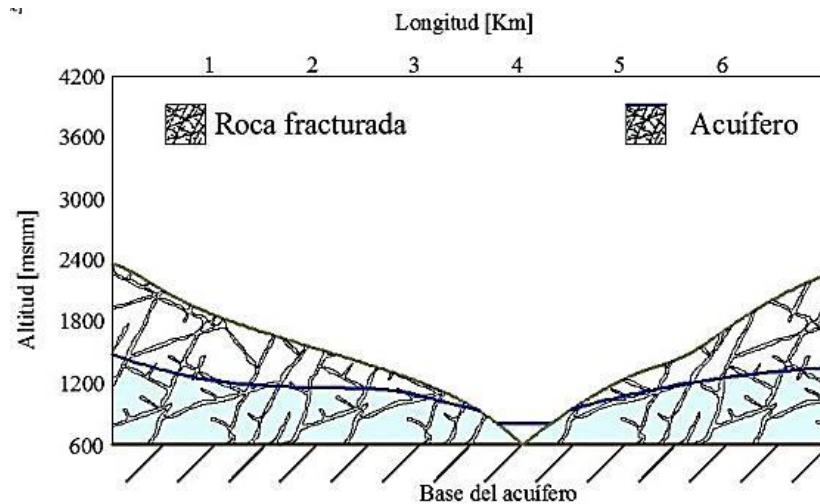
	<b>2009</b>		<b>2010</b>	
Precipitación	729,5	%	1391,0	%
Rora	608,8	83,5	941,50	67,7
Pulse	513,5	70,4	649,80	46,7

### 3 DISCUSIÓN

En la curva maestra de recesión de Figura 6 la forma cóncava de la curva expone el comportamiento no lineal del acuífero de la cuenca del río Suratá. La respuesta rápida de la descarga del flujo subterráneo (constante de recesión mayor) puede corresponder a la movilización de flujo proveniente de eventos previos de precipitación, mientras que la respuesta lenta (constante de recesión menor) puede deberse al retardo generado en los caminos que comunican al acuífero con el río.

En la Figura 7 se observa que la curva maestra de recesión puede ser modelada adecuadamente con  $b = 0.7$ . Wittenberg en [3] indica que  $b > 0.5$  en la ecuación (2) podría corresponder a tres casos: 1) a un acuífero que tiene capacidad de retención significativa en los canales del río que colectan el flujo desde la cuenca, 2) a un acuífero cuyo flujo subsuperficial es predominantemente turbulento o cuyos suelos son muy porosos y 3) a la contribución desde un acuífero confinado en el que puede haber un reservorio lineal capaz de incrementar el valor medio de la captación. Por tanto, el modelo conceptual de flujo propuesto a partir de las condiciones geológicas de la región y de las características de la curva maestra de recesión de las cuencas del río Suratá y del Río de Oro, se presenta en la Figura 18.

**Figura 18.** Modelo conceptual propuesto para la cuenca del río Suratá



En la separación del flujo base del flujo total a través del algoritmo de un parámetro no hay diferencia relevante entre los resultados de separación de flujo base y las constantes de recesión usadas e indicadas en la sección 2.3.1. Esto se debe a que la ecuación (3) conduce a un flujo base aproximadamente igual a 50% del caudal total para constantes de recesión cercanas a cero. Así mismo, este algoritmo no es una estimación confiable para las cuencas en estudio, porque asume una única constante de recesión para toda la serie de tiempo y así, desconoce la no linealidad del flujo subterráneo.

En el algoritmo de dos parámetros se incrementa el porcentaje de flujo base a medida que aumenta el valor de C, lo cual físicamente indica que, debido a la permeabilidad de la cuenca, en eventos de lluvia la recarga de las fuentes subterráneas ocurre más rápidamente, convirtiendo el exceso de agua en escorrentía directa [1].

En el algoritmo de tres parámetros la disposición de la ecuación (5) permite ver que el factor  $\beta_s/\beta_q$  puede tener una interpretación similar a la constante C del algoritmo anterior. Sin embargo, se destaca que todos los parámetros de este

algoritmo fueron hallados de manera empírica, según criterio profesional de la investigadora, basándose en el comportamiento gráfico del hidrograma de separación en los periodos de altas precipitaciones.

En el algoritmo de Nathan & McMahon cada paso significa menos flujo base como porcentaje del flujo total, debido a que cada uno de estos se basa en los resultados del anterior. De igual modo, se observa que el hidrograma de separación de flujo base, correspondiente al paso dos, presenta una idea errónea, en el cual el pico de recarga se ilustra previo al pico del caudal total.

En el algoritmo de Smakhtin & Watkins se percibe un comportamiento del hidrograma de recesión casi inalterado en los periodos de caudales máximos en toda la serie de tiempo; sin embargo, el porcentaje de flujo base no debe considerarse acertado, puesto que desconoce el fenómeno de recarga del acuífero y con él, el ciclo del agua subterránea.

El programa Rora estima la recarga neta del acuífero, que corresponde a la recarga en el nivel freático menos la infiltración a los acuíferos más profundos o menos la evapotranspiración de agua subterránea. Estas interacciones no son simples, por ejemplo, la recarga no está sincronizada con la descarga. En el modelo matemático se asumen una serie de condiciones hidrogeológicas que deben ser cumplidas para obtener una mejor estimación, así, la estación de aforo debe estar ubicada a la salida de la cuenca, en donde aproximadamente toda el agua subterránea de la cuenca se descarga a la corriente y el área de drenaje debe ser mayor a  $1 \text{ [milla}^2] = 2.59 \text{ [km}^2]$ . Se debe tener en cuenta que el programa Rora fue desarrollado usando las unidades de medida del sistema inglés, por tanto todos los datos de entrada deben ser convertidos previamente a este sistema.

El programa Rora y el programa Pulse utilizan la misma base matemática para estimar la recarga en acuíferos. Sin embargo, en Pulse el usuario tiene la posibilidad de modificar los valores de recarga estimada para acoplar la forma del hidrograma de separación de flujo base a la del hidrograma de caudales. Asimismo, se muestra que en algunos meses la estimación por Rora y por Pulse son idénticas, esto en consecuencia a que la serie de caudales del río Suratá está caracterizada por pequeñas precipitaciones visibles en el hidrograma que generan ruido pero no afectan la tendencia exponencial de la recesión, los programas identifican el incremento en el caudal como se muestra en la Figura 17 y dibuja una temporada de recesión adicional que a modo global, no existe en el hidrograma, de esta manera, la estimación de recarga en el programa Rora es mucho mayor que la precipitación en aquellos meses en los que Pulse fue modificado para articular el hidrograma de separación con el hidrograma de caudales.

## 4 CONCLUSIONES

El análisis del flujo de recesión permite determinar características de reserva de agua subterránea, además, es un prerrequisito para separar el flujo base del flujo total así como para estimar el almacenamiento y recarga de agua subterránea.

Se determinó que la cuenca del río Suratá y la cuenca superior del Río de Oro presentan un flujo subterráneo no lineal, es decir, en temporadas de precipitaciones nulas o periodos de recesión, la relación descarga de agua subterránea-tiempo puede ser descrita a través de una ecuación exponencial. Esta no linealidad de la región probablemente se debe a movimientos en la superficie libre (nivel freático) en las corrientes alimentadas por acuíferos no confinados, por ganancia o pérdida de agua subterránea gracias a escapes generados por evapotranspiración en la superficie del terreno, o por heterogeneidad en las capas geológicas que conforman las cuencas.

Los algoritmos numéricos usados en el programa G2 son una primera aproximación a la separación de flujo base del flujo total que brindan al usuario la libertad de ajustar los parámetros o constantes únicamente a través del comportamiento gráfico de los hidrogramas de separación, por tanto, necesariamente deben ser complementados con la aplicación de otro método de separación con que el que se puedan acreditar los porcentajes obtenidos. Los algoritmos numéricos de separación de flujo que mejor se ajustan a la serie de tiempo de caudales en la cuenca del río Suratá son el algoritmo de tres parámetros (69 % de flujo base del flujo total) y el paso 1 del algoritmo de Nathan y McMahon (78 % de flujo base del flujo total), cuyos hidrogramas de separación, a diferencia de los otros algoritmos, no sobrestiman el efecto de recarga ni subestiman el caudal base.

La recarga anual en el río de Oro oscila entre el 55% y 64% de la precipitación acumulada anual, y en la cuenca del río Suratá entre el rango de 47% a 84%. No obstante, en los dos años de estimación de recarga, no se identifica un mes en el cual la recarga sea siempre superior a los demás meses. Aunque las ecuaciones de Rorabaugh sugieren un valor de recarga de los acuíferos, no son el mejor método de estimación de recarga en las cuencas del río de Oro y el río Suratá ya que asumen un flujo subterráneo lineal y características geomorfológicas que las cuencas en estudio no cumplen (acuífero constante en ancho con flujo subterráneo lineal). Adicionalmente, el programa Pulse fue diseñado para analizar periodos iguales o inferiores a dos años, por lo que resulta impráctico emplearlo en toda la serie de tiempo de caudales.

## CITAS

- [1] GÓMEZ Derly, GÓMEZ Luz; Separación de flujo base en la cuenca del Río de Oro en la estación Conquistador Alto mediante la programación de algoritmos de no linealidad [Tesis de pregrado]. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. 2012.
  
- [2] RUTLEDGE Albert; Computer Programs for Describing the Recession of Ground-Water Discharge and for Estimating Mean Ground-Water Recharge and Discharge from Streamflow Record —Update; Investigation Report USGS, 1998.
  
- [3] WITTENBERG Hartmut; Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes; Hydrological Processes. No. 13, 1999, pp. 715-726
  
- [4] GÓMEZ Sully, GUZMÁN Jorge; Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija; Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, No. 61, Diciembre de 2011, pp. 41-52.
  
- [5] CHAPMAN Tom; A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation; Hydrological Processes, vol. 13, 1999, pp. 701-714.
  
- [6] CHAPMAN Tom, MAXWELL A; Baseflow separation - comparison of numerical methods with tracer experiments; Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, 1996, pp. 589-545.

- [7] BOUGHTON W, A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments; Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, 1993, pp. 317-324.
- [8] JAKEMAN A, HORNBERGER G; How much complexity is warranted in Rainfall-Ruoff Model; Water Resources Research, vol. 29, No. 8, 1993, pp. 2637-2649.
- [9] BALEK J; Groundwater recharge concepts. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge. Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series, 1988. pp. 3–9.
- [10] RORABAUGH M; Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow; Investigation report: USGS, 1964.
- [11] RUTLEDGE Albert; Model-Estimated Ground-Water Recharge and Hydrograph of Ground-Water Discharge to a Stream; Investigation Report USGS, 1997.
- [12] LEÓN Nelson, ROMERO Tomás; Modelamiento de los caudales de escorrentía para las cuencas de los ríos Suratá y Tona en el modelo conceptual agregado NAM; [Tesis de pregrado]. Bucaramanga, Colombia-Universidad Industrial de Santander, 2006.

## BIBLIOGRAFIA

COUTAGNE A; Les variations de débit en période non influencée par les précipitations”; La Houille Blanche. Septiembre-Octubre 1968; pp. 416-436.

FOLMAR G, GBUREK W, RISSER D; Comparison of methods for estimating ground water recharge and base flow at small watershed underlain by fractured bedrock in the Eastern United States; Investigation Report USGS, 2005.

FORERO Juan; Modelo hidrogeológico distribuido de la cuenca superior del Río de Oro; [Tesis de postgrado]. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.

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

MACHUCA Diana; Separación de flujo base en la cuenca alta del Río de Oro utilizando algoritmos numéricos; [Tesis de pregrado]. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander, 2012.

MANGIN A, PULIDO-BOSCH A, PADILLA A; Relative Importance of Baseflow and Quickflow from Hydrographs of Karst Spring; Ground Water, vol. 32, No 2, March-April 1994, pp. 267-277.

SMAKHTIN V; Low Flow hydrology: a review; Elsevier, No. 240, South Africa, pp. 147-186.

SOPHOCLEOUS Marios; Interactions between groundwater and surface water: the state of the science; Hydrogeology Journal, vol. 10, 2002, pp. 52-67.