

CALIBRACION DEL MODELO LLUVIA-ESCORRENTIA AGREGADO GR4J APLICACIÓN: CUENCA DEL RÍO ABURRÁ

CALIBRATION OF GR4J LUMPED RAINFALL-RUNOFF MODEL APPLICATION: RIO ABURRÁ CACHTMENT

LUIS_FERNANDO CARVAJAL

Profesor Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Universidad Nacional de Colombia e-mail:lfcarvaj@unal.edu.co

ERNESTO ROLDÁN

Ingeniero Civil Universidad Nacional de Colombia e-mail:eroldan@unal.edu.co

Recibido para revisar 26 de Marzo de 2006, Aceptado 8 de Agosto de 2006, Versión final 13 de Febrero de 2007

RESUMEN: El presente trabajo muestra la calibración del modelo lluvia-escorrentía GR4J en 8 subcuencas de la cuenca del río Aburrá. Este modelo es considerado parsimonioso ya que solo tiene 4 parámetros. La calibración incluye la optimización de los parámetros. La calidad del ajuste se verificó comparando la serie simulada de caudales y el respectivo registro, las curvas de duración de caudales, así como mediante 4 criterios de eficiencia. Los resultados muestran en general ajustes aceptable, si se tiene en cuenta la variabilidad del área de las subcuencas, de la precipitación y de la evaporación, y el efecto de la zona urbana en cuanto al aporte de caudales de aguas residuales.

PALABRAS CLAVE: modelo lluvia-escorrentía, calibración modelo, hidrología superficial, cuenca urbano-rural.

ABSTRACT: This job shows the calibration of GR4J lumped rainfall-runoff model in eight subcatchments of the Aburra river catchment. This model is considered parsimonious because it only has four parameters. The calibration included the optimization of parameters. The fitting was verified with four performance criteria and the simulated and gauged streamflow duration curves are compared. The results show a quit good calibration. There is that to have into account the catchment area variability, in the same way the evaporation and the efect of waste water in the streamflow regime because to the urban zone.

KEY WORDS: rainfall-runoff model, model calibrating, surface hydrology, rural-urban catchment.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos lluvia escorrentía agregados son valiosos para predecir y simular los caudales con base en una conceptualización que represente en forma simplificada los procesos físicos en la cuenca: infiltración, evaporación, flujo subsuperficial y flujo subterráneo. El tránsito en los canales se hace en forma agregada considerando una hidrógrafa unitaria.

En Colombia y en el posgrado de Recursos Hidráulicos se han trabajado diferentes modelos lluvia-escorrentía como: modelo de humedad del suelo de Sacramento y el modelo conceptual de tanques (*ver Vélez, 2001; UNAL-UDEA-UPB-UDEM, 2004; UNAL-EPM, 1998; Cardona, 1996*). En los últimos años se ha trabajado la inteligencia artificial, especialmente las redes neuronales para representar procesos lluvia-escorrentía en una cuenca (*Chang and Chen, 2001*). Esta modelación es de tipo caja negra, en

la cual no se tiene en cuenta los conceptos básicos de los procesos lluvia-escorrentía.

También se han hecho evaluaciones teórico-prácticas de las relaciones lluvia-escorrentía por medio de los modelos autorregresivos y de promedio móvil aplicados a varias cuencas del Departamento de Antioquia (*Lopera y Lopera, 1984*). Los procesos lluvia escorrentía se pueden modelar en forma matemática a través de los Kernels óptimos para un conjunto de eventos de lluvia-escorrentía simultáneamente (*López, 1987*).

En el año 1995, se implementó la metodología de Predicción extendida de caudales en la cual se utiliza los periodos históricos de precipitación con igual fecha calendario al periodo que se quiere predecir, dando como resultado, con un modelo lluvia-escorrentía, un conjunto de trazas de caudales, las cuales se ponderan por factores que representan la semejanza con las condiciones climáticas presentes, de acuerdo a una variable climática seleccionada previamente. De esta forma se obtiene una traza de caudales ponderada para el periodo de predicción (*UNAL-ISA, 1995; Salazar et al, 1998*).

En el presente artículo se muestra la calibración del modelo GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier, siglas en Francés*), el cual es un modelo de 4 parámetros, es decir, parsimonioso. El objetivo es obtener con pocos parámetros las mejores simulaciones posibles del tal forma que la incertidumbre asociada al proceso de calibración no dependa fuertemente del número de parámetros del modelo. Este modelo fue desarrollado en Francia por *Perrin et al, 2003*. El modelo GR4J ha sido calibrado en numerosas cuencas de Francia, Estados Unidos y Australia. La calibración de este modelo en una cuenca con características de clima tropical permite establecer cual sería su aplicabilidad en un medio donde la variabilidad espacial y temporal de la precipitación es alta y además en una cuenca con desarrollo urbano alto y cuyas aguas residuales afectan el régimen de caudales diarios. La calidad del ajuste es evaluado a través de la curva de duración de caudales y con 4 criterios de eficiencia calculados en el rango de caudales máximos, medios y mínimos.

Se calibró el modelo para la cuenca del río Aburrá, la cual se subdividió en 8 subcuencas a lo largo del eje del río. Además, la cuenca comprende el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Por lo tanto, disponer de una metodología para el cálculo de los caudales diarios en cualquier punto de interés es muy importante para el desarrollo de redes de monitoreo de variables hidrológicas y de calidad de agua con el objetivo de tomar decisiones para el manejo integral del recurso agua en la cuenca.

El artículo presenta en el numeral 2 la descripción e información empleada, el numeral 3 es un breve resumen teórico del modelo GR4J, el numeral 4 da cuenta de la metodología de calibración, en el numeral 5 se muestran los resultados en la cuenca del río Aburrá y en los numerales 6 y 7 el análisis de resultados y las conclusiones, respectivamente.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ E INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

La cuenca del río Aburrá tiene su nacimiento en el alto de San Miguel y termina antes de la descarga del río *Grande*, donde cambia su nombre a río *Porce*. Hasta este punto la cuenca tiene un área de 1220 Km², ver Figura 1. Esta cuenca contiene el área Metropolitana conformada por la ciudad de Medellín y nueve municipios más, a saber: Caldas, La Estrella, Itagüi, Sabaneta, Envigado, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa, en el departamento de Antioquia.

El río Aburrá, en su recorrido, atraviesa zonas climáticas y geomorfológicas muy diferentes que sumadas al alto grado de antrópización e industrialización de la cuenca hace que la determinación de los caudales tengan un alto grado de incertidumbre y generen un procedimiento laborioso para el cálculo de caudales y en el que se deben analizar los aspectos que afectan la simulación de los mismos.

Los nombres de las estaciones de caudal y la precipitación promedio asociadas a las 8

subcuencas definidas se presenta en la Tabla 1. Las estaciones de precipitación para la calibración se escogieron de tal forma que generaran una adecuada representación de la distribución espacial de la precipitación. Además se escogieron las estaciones de precipitación que tuvieran periodos en común con las estaciones

de caudal. La Tabla 2, muestra un reporte de las estaciones de precipitación utilizadas en la calibración del modelo y las estaciones de caudal asociadas.

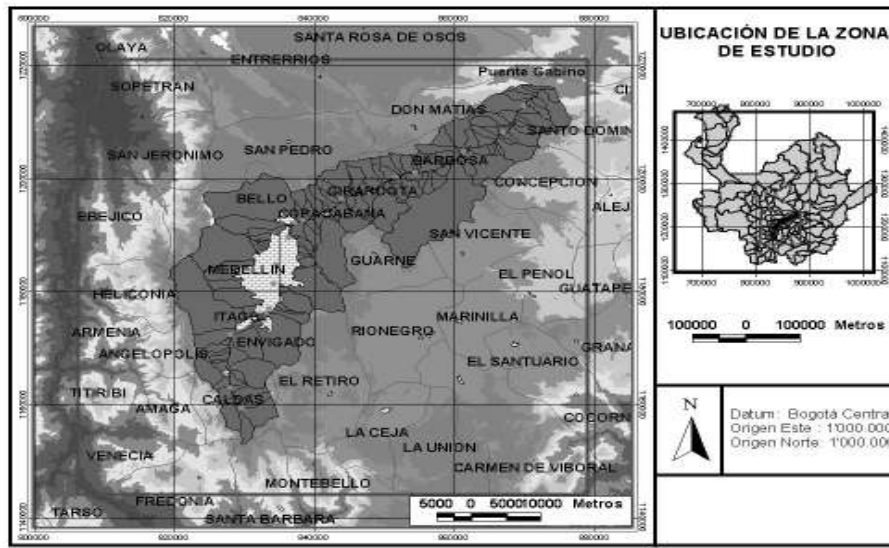


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Departamento de Antioquia, Colombia (UNAL-UDEA-UDEM-UPB, 2004).

Figure 1. Localization of interest area. Antioquia Province, Colombia (UNAL,-UDEA-UDEM-UPB, 2004)

Tabla 1. Estaciones de caudal utilizadas para la calibración del modelo
Table 1. Discharge gauge stations to model calibration

CODIGO	NOMBRE	Área (km ²)	P MEDIA (mm/año)	P diaria (mm/d)	ETP (mm/d)	Q diario (mm/d)
2701733	SALADA_LA_RMS_11	43.77	2186.9	5.4	2.7	3.151
2701716	CALDAS_RM_16	101.00	2183.7	6.4	3.0	4.668
2701727	ANCON_SUR_RMS_17	121.93	2159.5	5.8	2.7	3.516
2701734	MACHADO_RMS.12	639.24	1905.5	5.4	2.7	2.961
2701781	ANCON_NORTE_RMS_20	738.49	1872.6	5.3	2.7	2.814
2701803	GIRAROTA	783.42	1863.8	5.3	2.7	2.874
2701738	HATILLO_EL_RMS.13	862.79	1858.5	5.1	2.7	3.068
2701735	YARUMITO_RMS_14	1099.1	1928.9	5.4	2.7	3.154

Tabla 2. Estaciones de precipitación utilizadas para la calibración del modelo de tanques sobre el Río Aburrá
Table 2. Precipitation gauge stations to calibration of model tanks on Aburrá River.

ESTACIÓN DE CAUDAL	ESTACIÓN DE PRECIPITACIÓN					
	Caldas (2701036)	San Antonio (2701038)	Ayurá (2701093)	X	X	X
SALADA_LA_RMS_11	Caldas (2701036)	San Antonio (2701038)	Ayurá (2701093)	X	X	X
CALDAS_RM_16	Caldas (2701036)	San Antonio (2701038)	Ayurá (2701093)	X	X	X
ANCON_SUR_RMS_17	Caldas (2701036)	San Antonio (2701038)	Ayurá (2701093)	Salada (2701526)	X	X
MACHADO_RMS_12	Caldas (2701036)	San Antonio (2701038)	Ayurá (2701093)	San Cristobal (2701046)	Aeropuerto (2701507)	Tulio Ospina (2701509)
ANCON_NORTE_RMS_20	Caldas (2701036)	San Antonio (2701038)	M. Aguinaga (2701047)	San Cristobal (2701046)	Aeropuerto (2701507)	Tulio Ospina (2701509)
GIRARDOTA	Ayurá (2701093)	San Antonio (2701038)	M. Aguinaga (2701047)	Girardota (2701056)	Aeropuerto (2701507)	Tulio Ospina (2701509)
HATILLO_EL_RMS_13	Ayurá (2701093)	San Antonio (2701038)	M. Aguinaga (2701047)	Girardota (2701056)	Aeropuerto (2701507)	Tulio Ospina (2701509)
YARUMITO_RMS_14	Hda. Progreso (2701515)	San Antonio (2701038)	M. Aguinaga (2701047)	Girardota (2701056)	Aeropuerto (2701507)	Tulio Ospina (2701509)

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO LLUVIA-ESCORRENTÍA GR4J

El modelo GR4J es un modelo lluvia-escorrentía agregado, de 4 parámetros y resolución diaria (Perrin et al, 2003). En este numeral se presenta una descripción general del modelo, ver Figura 2. En el modelo la precipitación y la evapotranspiración potencial se denotan como P y E respectivamente. P es calculada según los registros de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial. E puede ser un valor promedio diario de largo plazo (Barco et al, 2000; Chávez y Jaramillo, 1999). Todas las cantidades (entradas, salidas, variables internas) están expresadas en mm, por tal motivo, los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cuando sea

necesario. En la tabla 3 se presentan los parámetros del modelo:

Tabla 3. Parámetros del modelo GR4J.
Table 3. GR4J model Parameters.

x_1 (mm)	Capacidad máxima del tanque de producción
x_2 (mm)	Coefficiente de intercambio de aguas subterráneas
x_3 (mm)	Capacidad máxima para el tránsito en canales
x_4 (días)	Tiempo base del hidrograma unitario UH1

Determinación de la precipitación y evapotranspiración potencial neta. La primera operación consiste en restar la

evapotranspiración potencial de la precipitación, con el fin de determinar una precipitación neta P_n o una capacidad de evapotranspiración E_n . En el modelo GR4J, esta operación es calculada como si la capacidad de intercepción fuera cero:

Si $P \geq E$, entonces $P_n = P - E$ y $E_n = 0$ (1)

Si $P < E$, entonces $P_n = 0$ y $E_n = E - P$ (2)

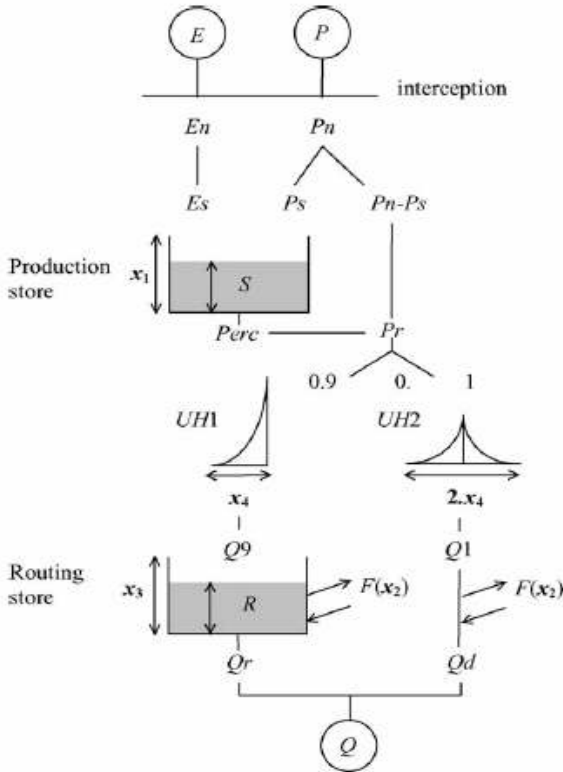


Figura 2. Descripción del modelo lluvia-escorrentía GR4J (Perrin et al, 2003)

Figure 2. Description of GR4J streamflow-rainfall model (Perrin et al, 2003)

Almacenamiento de producción. En el caso en que P_n no es cero, una parte P_s de P_n , entra al tanque de producción:

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad (3)$$

P_s es determinada como una función del nivel S en el tanque, donde x_1 (mm) es la máxima capacidad del tanque de producción.

Cuando E_n no es cero, una tasa real de evaporación es determinada como una función del nivel en el almacenamiento de producción con el fin de calcular la cantidad E_s de agua que se evaporará del tanque.

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)} \quad (4)$$

De esta forma, el contenido de agua en el tanque de producción se actualiza como:

$$S = S - E_s + P_s \quad (5)$$

Es importante resaltar que S nunca puede exceder a x_1 . Una cantidad $Perc$ se escapa como percolación del almacenamiento de producción. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 x_1} \right) \right]^4 \right\}^{-\frac{1}{4}} \quad (6)$$

De la expresión anterior se concluye que la percolación no contribuye mucho al caudal, por esta razón es importante principalmente para la simulación de eventos mínimos. El valor de $Perc$ es siempre menor que S . El nuevo nivel en el tanque queda definido como:

$$S = S - Perc \quad (7)$$

Distribución lineal con hidrógrafas unitarias. La cantidad total de agua P_r que alcanza las funciones de distribución esta dada por:

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (8)$$

El valor de P_r se divide en dos componentes de flujo: el 90% de P_r se distribuye por medio de una hidrógrafa unitaria UH1 y luego por un

tanque de distribución no lineal. El 10% restante de P_r es distribuido por medio de una hidrógrafa unitaria UH2. Con UH1 y UH2, se puede simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. Las ordenadas de ambas hidrógrafas son usadas en el modelo para distribuir la lluvia efectiva sobre varios intervalos de tiempo sucesivos. UH1 y UH2 dependen del mismo parámetro x_4 expresado en días, sin embargo, UH1 tiene un tiempo base de x_4 días, mientras que UH2 tiene un tiempo base de $2x_4$ días. El parámetro x_4 puede tomar valores reales y debe ser mayor de 0.5 días.

En su forma discreta, las hidrógrafas unitarias UH1 y UH2 tienen n y m ordenadas respectivamente, donde n y m son los enteros más pequeños que exceden x_4 y $2x_4$ respectivamente. Las ordenadas de ambas hidrógrafas se derivan de las curvas-S correspondientes (proporción acumulada de la entrada con el tiempo) denotadas por SH1 y SH2 respectivamente. SH1 está definida a lo largo del intervalo de tiempo t de la siguiente forma:

Para $t \leq 0$, $SH1(t) = 0$ (9)

Para $0 < t < x_4$, $SH1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}}$ (10)

Para $t \geq x_4$, $SH1(t) = 1$ (11)

SH2 se define similarmente:

Para $t \leq 0$, $SH2(t) = 0$ (12)

Para $0 < t \leq x_4$, $SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}}$ (13)

Para $x_4 < t < 2x_4$, $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{x_4}\right)^{\frac{5}{2}}$ (14)

Para $t \geq 2x_4$, $SH2(t) = 1$ (15)

Finalmente, las ordenadas de UH1 y UH2 se calculan como:

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad (16)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad (17)$$

Donde j es un entero.

Intercambio de agua en la cuenca. Posteriormente se calcula un término F que actúa en ambas componentes de flujo, el cual indica el intercambio de agua subterránea:

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (18)$$

R es el nivel en el tanque de distribución, x_3 es la capacidad de referencia y x_2 es el coeficiente de intercambio. El parámetro x_2 puede ser positivo en el caso en que se importa agua, negativo en el caso en que hay pérdidas, o cero cuando no hay intercambio de agua. Entre más alto el nivel en el tanque de distribución mayor es el intercambio. En valor absoluto, F no puede ser mayor que x_2 , puesto que el coeficiente de intercambio representa la máxima cantidad de agua que puede ser adicionada (o liberada) a (de) cada componente de flujo, cuando el nivel en el tanque de distribución es igual a x_3 .

Almacenamiento de distribución no lineal. El valor de R se actualiza adicionando el término F y la salida Q_9 proveniente de UH1:

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \quad (19)$$

El caudal de salida del tanque, Q_r , se calcula entonces como:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3}\right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (20)$$

Q_r siempre es menor que R . El nuevo nivel en el almacenamiento es:

$$R = R - Q_r \quad (21)$$

Aunque al comienzo de un intervalo de tiempo el tanque puede recibir una cantidad de agua mayor que el déficit de saturación $x_3 - R$, el nivel en el tanque nunca puede exceder la capacidad x_3 al final del intervalo de tiempo. Por esta razón, la capacidad x_3 es llamada la capacidad máxima

diaria. Este tanque de distribución esta en la capacidad de simular recesiones cuando sea necesario.

Caudal total. La salida QI proveniente de UH2, también está sujeta al intercambio de agua F , de esta forma la componente Q_d queda definida de la siguiente forma:

$$Q_d = \max(0; QI + F) \quad (22)$$

Finalmente, el caudal total se calcula como:

$$Q = Q_r + Q_d \quad (23)$$

4. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO GR4J

Una vez recopilada la información se procede a realizar la simulación de caudales en las estaciones con registros en cada una de las 8 subcuencas (la programación del modelo GR4J se realizó en Excel). La precipitación media se calculó en cada cuenca según los registros de las estaciones más cercanas, empleando factores de ponderación, por otra parte, siguiendo las recomendaciones de investigaciones que abarcan la región de estudio, la evapotranspiración potencial se estimó utilizando la ecuación de Turc modificado (*Barco et al, 2000*). Esta fase de calibración permite obtener los parámetros del modelo, para los cuales la serie simulada representa con mayor precisión la serie observada. Con el fin de optimizar los resultados del modelo GR4J, se utilizó la herramienta Solver de Microsoft Excel para obtener el conjunto de valores x_1, x_2, x_3, x_4 , para los cuales los criterios de eficiencia son máximos.

Para estimar la bondad de ajuste de las calibraciones se utilizaron los criterios de eficiencia 24 a 27:

$$E(Q) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum (\bar{Q} - Q_i)^2} \right) \quad (24)$$

$$E((Q)^2) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum (\sqrt{Q_i} - \sqrt{\hat{Q}_i})^2}{\sum (\text{Prom}(\sqrt{Q_i}) - \sqrt{Q_i})^2} \right) \quad (25)$$

$$E(Ln(Q - \bar{Q}/40)) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum (Ln(Q_i - \frac{\bar{Q}}{40}) - Ln(\hat{Q}_i - \frac{\bar{Q}}{40}))^2}{\sum (\text{Prom}(Ln(Q_i - \frac{\bar{Q}}{40})) - Ln(Q_i - \frac{\bar{Q}}{40}))^2} \right) \quad (26)$$

$$\text{Balance} = 100 * \frac{\sum \hat{Q}_i}{\sum Q_i} \quad (27)$$

Donde: Q_i es el caudal observado en el día i , \hat{Q}_i es el caudal simulado para el día i y \bar{Q} es el caudal medio de los caudales observados.

También se emplea para verificar la bondad del ajuste la comparación de la curva de duración de caudales registrados y simulados. Para evitar los efectos adversos de los valores iniciales de los parámetros del modelo, se definió como período de calentamiento el primer año de simulación para evaluar los criterios de eficiencia.

5. APLICACIÓN DEL MODELO GR4J A LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ

Se calibró el modelo para las estaciones definidas en el numeral 2. Los resultados de la calibración de los parámetros se presentan en la tabla 4 y los criterios de eficiencia en la tabla 5. Los cambios en el uso del suelo y las descargas de aguas servidas como producto del transvase de cuencas vecinas al río Aburrá, tienen una gran influencia en las estaciones ubicadas sobre el eje del río en la parte central de la cuenca. Estas estaciones son Machado, Ancón Norte y Girardota. Las estaciones que se encuentran aguas arriba del municipio de Caldas son casi rurales, por lo tanto el aporte de aguas servidas proveniente de cuencas vecinas no es importante. El municipio de Caldas efectúa descargas directas que pueden ser consideradas a partir de la estación Ancón Sur, sin embargo, este aporte en este punto es despreciable. Por otra parte, en las estaciones ubicadas aguas abajo de Girardota (El Hatillo y Yarumito), no fueron

incluidos los efectos de las descargas residuales, debido a que constituyen porcentajes relativamente bajos respecto a la cantidad de agua que naturalmente se produce por acción de la transformación de lluvia en escorrentía.

La magnitud de caudal de aguas residuales acumulada estimada para las estaciones Machado, Ancón Norte y Girardota (UNAL-

UDEA-UPB-UDEM, 2004) son: 3.48, 4.55 y 4.64 m³/s, respectivamente. Las Figura 3, 5 y 6 muestran para las estaciones Ancón Sur, Machado y Girardota las series de caudales simuladas y registradas y las Figuras 4, 6 y 7 las respectivas curvas de duración simuladas y registradas.

Tabla 4. Parámetros del modelo GR4J en las cuencas calibradas
Table 4. GR4J model Parameters in the calibrated catchments

Estación	Área de la Cuenca (Km ²)	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (días)
La Salada	43,77	1226.70	1.27	225.06	1.16
Caldas	101,00	3406,76	3,54	293,19	1,04
Ancón Sur	121,93	1563.54	0.68	235.94	1.20
Machado	639,24	1778.85	0.36	127.73	1.23
Ancón Norte	738,49	3299.87	-0.13	81.01	1.16
Girardota	783,42	2243.32	0.30	66.31	1.05
El Hatillo	862,79	2083.34	1.12	84.09	1.41
Yarumito	1099,10	2368.06	0.82	111.60	1.44

Tabla 5. Criterios de eficiencia para evaluar la bondad de ajuste de la calibración
Table 5. Efficiency criteria to evaluate the calibration fitting

Estación	Criterios de Eficiencia (%)			
	$E(Q)$	$E((Q)^{1/2})$	$E((\ln(Q + \bar{Q}/40)))$	Balance
La Salada	54.2	62.1	66	100
Caldas	53.9	54.7	53.1	97.9
Ancón Sur	73.4	77.5	79.1	99.3
Machado	69.9	73.1	74.7	99.2
Ancón Norte	58.4	62.7	64.8	98.1
Girardota	67.3	69.2	69.2	100
El Hatillo	62.7	64.2	61.7	100
Yarumito	64.5	67.4	67.4	100

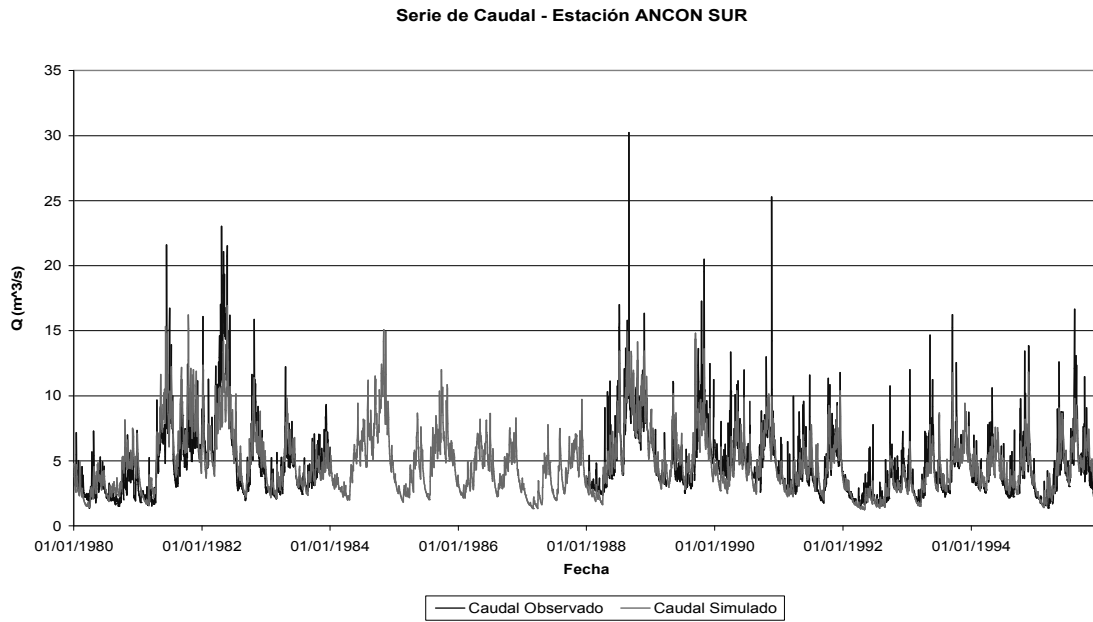


Figura 3. Series de caudales simulada y Observada para la subcuenca sobre el Río Aburrá con salida en la estación Ancón Sur.

Figure 3. Simulated and observed streamflows series at Ancon Sur discharge gauge station.

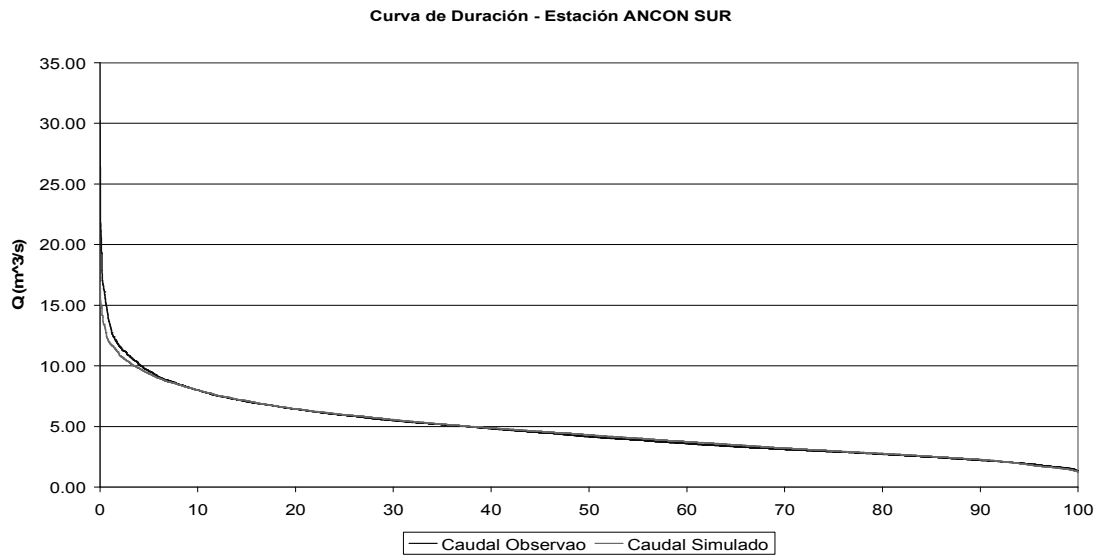


Figura 4. Curva de duración de caudales simulados y observados en la subcuenca sobre el Río Aburrá con salida en la estación Ancón Sur.

Figure 4. Simulated and observed streamflow duration curves at Ancon Sur discharge gauge station.

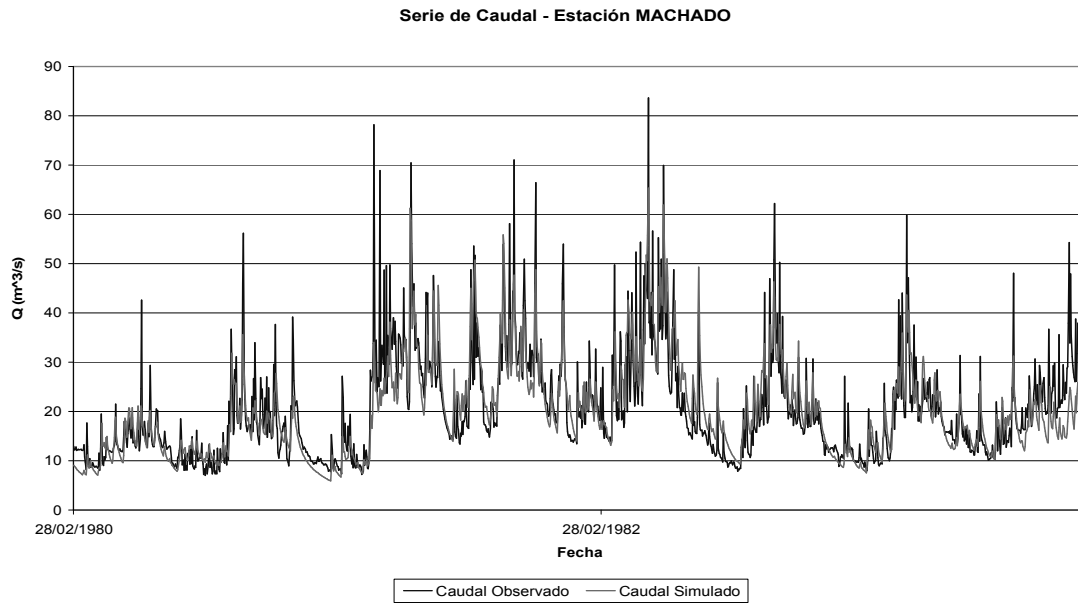


Figura 5. Series de caudales simulada y observada para la subcuenca sobre el Río Aburrá con salida en la **estación Machado.**

Figure 5. Simulated and observed streamflows series at Machado Sur discharge gauge station.

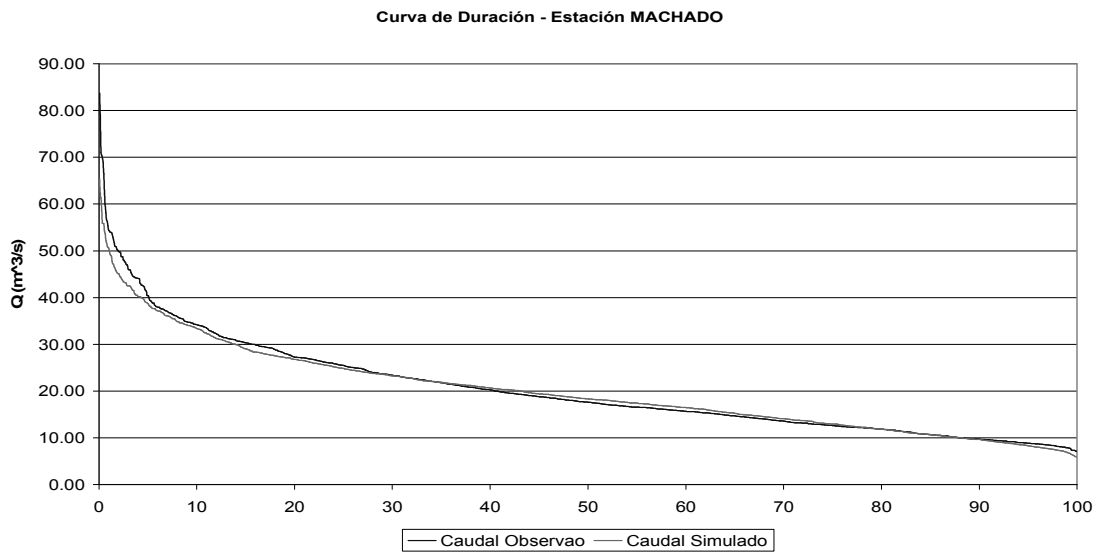


Figura 6. Curvas de duración de caudales simulados y observados en la subcuenca sobre el Río Aburrá con salida en la estación Machado.

Figure 6. Simulated and observed discharge duration curve at Machado discharge gauge station

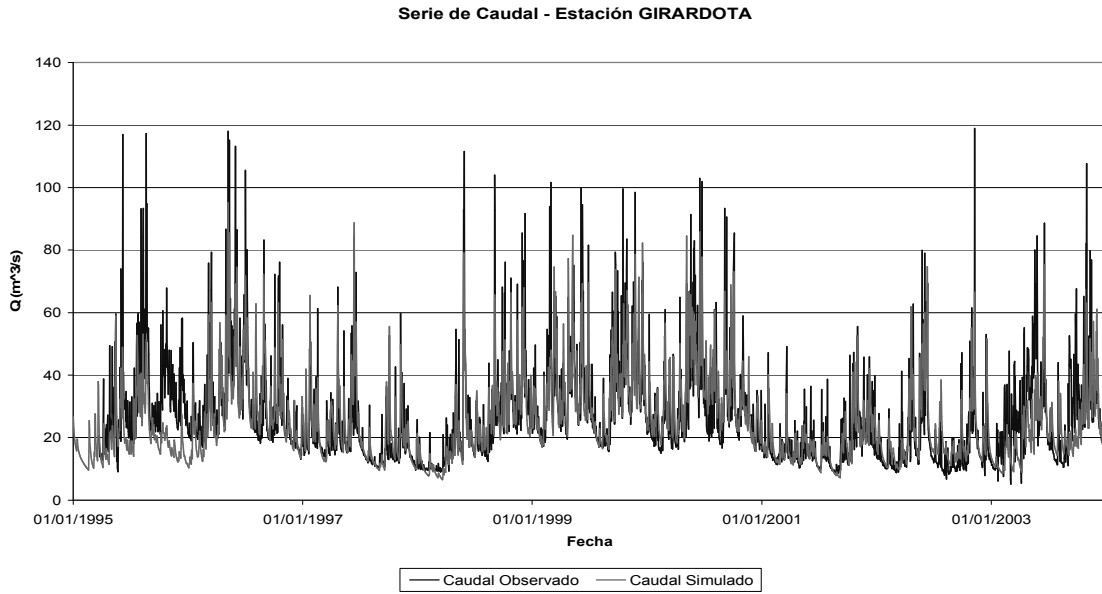


Figura 7. Series de caudales simulada y observada para la subcuenca sobre el Río Aburrá con salida en la estación Girardota.

Figure 7. Simulated and observed discharge series at Girardota Sur discharge gauge station.

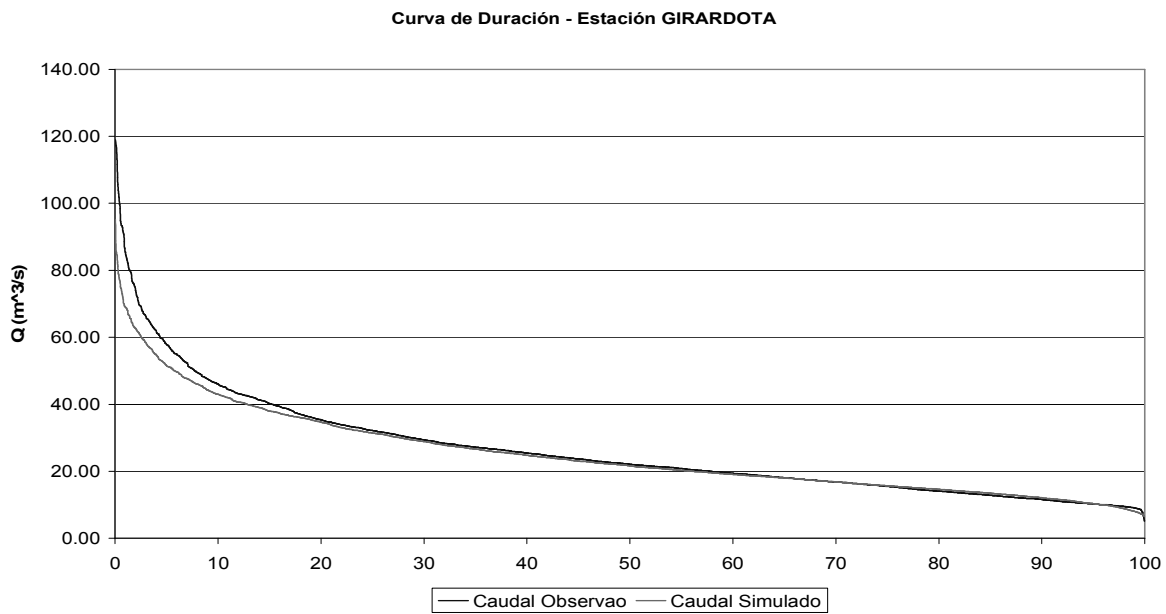


Figura 8. Curvas de duración de caudales simulados y observados en la subcuenca sobre el Río Aburrá con salida en la estación Girardota.

Figure 8. Simulated and observed discharge duration curves at Girardota discharge gauge station.

En el modelo GR4J la cantidad de precipitación, P_r , se divide en dos componentes de flujo de 10 y 90%. Como ejercicio académico se realizó el proceso de optimización para la calibración en las diferentes cuencas, tomando esta división como un nuevo parámetro. De esta forma una cantidad ϕP_r se distribuye por medio de la hidrógrafa unitaria UH1, y una cantidad $(1 - \phi)P_r$ se distribuye por medio de la hidrógrafa

unitaria UH2. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

Se puede concluir que la adición del nuevo parámetro aumenta la complejidad del modelo sin que se obtenga una mejora significativa en la eficiencia del mismo.

Tabla 6. Eficiencia obtenida en la calibración del modelo GR4J, tomando la división de la lluvia efectiva, ϕ , como parámetro adicional.

Table 6. Efficiency of GR4J model calibration with the effective rainfall division, ϕ , like an additional parameter.

Estación	ϕ	Criterios de Eficiencia (%)			
		$E(Q)$	$E((Q)^{1/2})$	$E((\ln(Q + \bar{Q}/40)))$	Balance
La Salada	0.87	54.46	62.09	65.39	97.47
Caldas	0.82	54.26	54.91	53.27	98.02
Ancón Sur	0.81	73.81	78.02	79.81	99.08
Chorrillos	0.92	69.75	73.66	74.67	100.00
Machado	0.75	71.27	74.29	75.88	99.43
Ancón Norte	0.67	59.99	64.44	66.62	98.31
Girardota	0.67	68.47	69.92	69.38	99.17
El Hatillo	0.61	66.16	66.72	61.34	97.94
Yarumito	0.67	66.77	69.23	68.05	98.08

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En general en las diferentes cuencas en las que se calibró el modelo, se encontró que el primer tramo de la curva de duración para los caudales simulados estaba por debajo de la obtenida para los caudales observados (caudales con un porcentaje de excedencia menor al 15 % aproximadamente). Este resultado refleja la incapacidad del modelo para representar eventos máximos. Por el contrario, el modelo captura satisfactoriamente los eventos mínimos presentes en la serie de caudales observados.

En todos los casos el valor obtenido para el parámetro x_1 (máxima capacidad del tanque de producción) es considerablemente alto. El tanque de producción no tiene un significado físico directo, por tal motivo es difícil interpretar estos

resultados en términos físicos. En investigaciones anteriores se ha encontrado que entre mayor sea la precipitación sobre la cuenca, mayor es la capacidad del tanque de producción. Este hecho explica en cierta medida los resultados encontrados, puesto que la precipitación media en la región de estudio es relativamente alta. Por otra parte, considerando la alta variabilidad temporal y espacial de la lluvia cuando se incrementa el área de la cuenca a lo largo del eje del río y que el campo de la lluvia se aplica a toda la cuenca, hace que se obtengan valores altos del parámetro x_1 , de esta forma el modelo con el proceso de optimización ajusta el balance hídrico dentro de la cuenca.

El parámetro x_4 que refleja el tiempo de respuesta de la cuenca en convertir la lluvia a caudal presenta valores similares de 1 a 1,5 días.

Es importante observar que prácticamente independiente del área de la subcuenca el parámetro tiene valores muy similares.

El parámetro x_3 , que representa el almacenamiento hidráulico, es decir, en los canales, presenta dos tendencias. La primera es que hasta la estación Ancón Sur los valores están entre 225 y 293 mm. Estos valores corresponden a la zona alta de la cuenca en la cual no hay un alto efecto de urbanización. Para la estación de Machado hacia aguas abajo los valores están entre 66 y 128 mm. Comparativamente se observa una relación inversa con el parámetro x_1 . Los valores bajos de x_1 están acompañados de valores altos de x_3 y viceversa. Se puede entender que en la zona urbana el río Aburrá está canalizado y el parámetro de almacenamiento hidráulico es bajo y en la zona alta de la cuenca el río está menos intervenido.

El parámetro x_2 , presenta valores positivos con excepción de la estación Ancón Norte, que es negativo. El valor positivo muestra aporte del flujo subterráneo al canal, caso contrario en la estación Ancón Norte. La explicación es que en la estación Machado se tiene en cuenta el caudal de aguas residuales, el cual es importado de cuencas vecinas; esto hace que en la calibración para que haya un ajuste aceptable con la precipitación el flujo subterráneo disminuye el aporte y en la estación Ancón Norte para que se cumpla con el balance de agua el río aporta al flujo subterráneo; en las demás estaciones el valor vuelve a ser positivo, esto debido a que por área de la cuenca y el campo de precipitación aplicada, las entradas no superan las salidas de la cuenca.

La ecuación utilizada para estimar la evapotranspiración potencial (Turc Modificado), es función de la radiación solar incidente y de la temperatura. Dentro de la región de estudio hay muy pocas estaciones hidrometeorológicas con información de temperatura, por esta razón se asumió que la temperatura media diaria sobre

cada cuenca era constante (los diferentes valores de temperatura fueron obtenidos la regionalización con la altura del terreno. De esta forma se obtuvo un valor diario constante de evapotranspiración potencial en cada una de las cuencas calibradas. Esta suposición no se aleja mucho de la realidad, ya que en Colombia no hay un cambio de estación invierno-verano muy fuerte, sin embargo, esta aproximación pudo haber disminuido en cierto grado la eficiencia del modelo. Sería conveniente considerar en una futura oportunidad calcular el ciclo anual de la evapotranspiración e incluirlo en la calibración.

La calibración del modelo en cuanto a los tres primeros criterios de eficiencia (ver Tabla 5) muestra el peor desempeño para la estación Caldas con valores promedio del 54% y el mejor desempeño en la estación Ancón Sur con valores promedio del 76.7%. El criterio de balance siempre presenta un buen ajuste cercano al 100%. La estación Caldas no arrojó buenos resultados, esto puede ser debido a problemas de calibración o toma de datos en la estación, o a errores asociados al cálculo de la precipitación media sobre la cuenca debido a la información.

En las figuras 4.19 y 4.20 se observa que el comportamiento a lo largo del tiempo de ambas relaciones, S/x_1 y R/x_3 , es similar para las diferentes subcuencas sobre río Aburrá.

La calibración del modelo GR4J muestra un buen ajuste gráfico en cuanto al patrón de variabilidad de los caudales con excepción de los caudales máximos, en los cuales el ajuste los valores extremos observados superan los simulados. Este comportamiento es lógico, ya que este modelo es agregado. Para complementar el desempeño del modelo presentan en las figuras 9 y 10, la evolución diaria de los almacenamientos en el tanque de producción y en el tanque tránsito en canales adimensionalizados por los respectivos parámetros x_1 y x_3 .

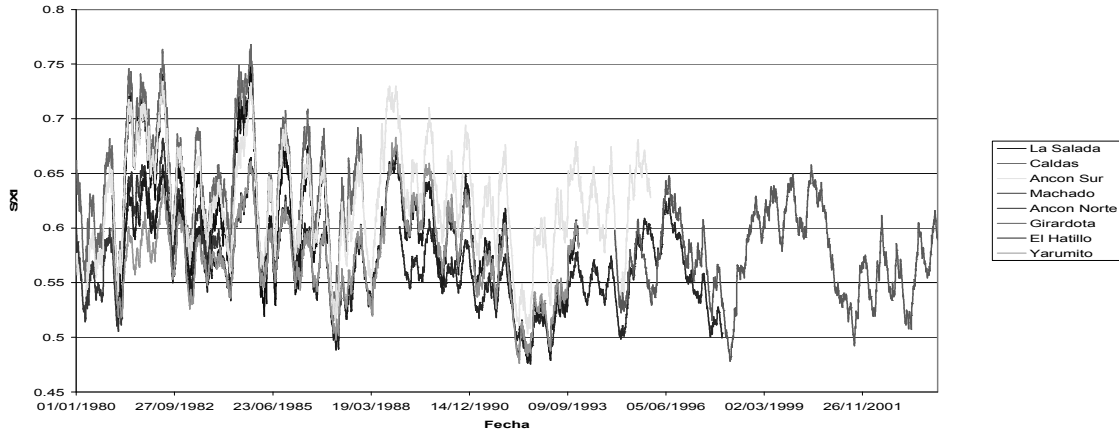


Figura 9. Variación diaria de la relación S/x_1 .
Figure 9. Daily variation of relation S/x_1

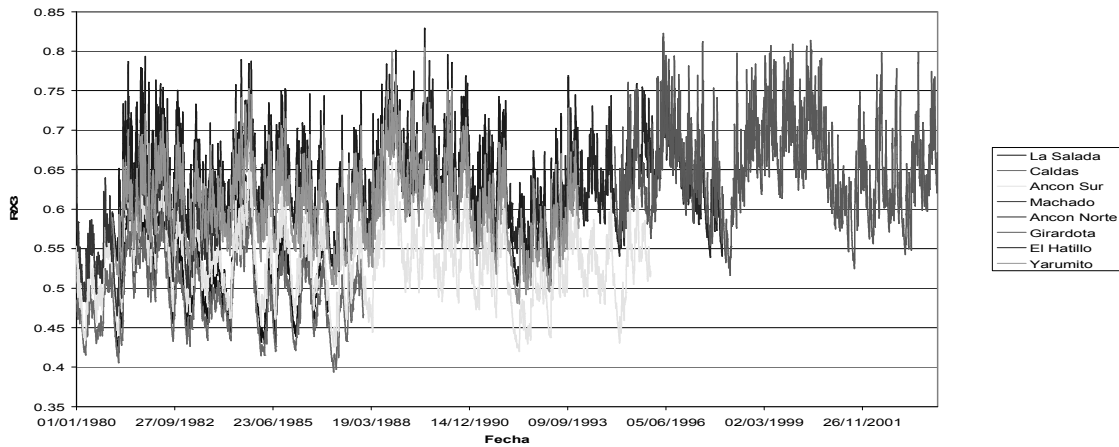


Figura 10. Variación diaria de la relación R/x_3 .
Figure 10. Daily variation of relation R/x_3

En general las relaciones de las Figura 9 y 10, muestran patrones similares a lo largo del río. En la variación de la relación x_1/S , se observa que a medida que se avanza en dirección de la corriente las series muestran valores menores, y en la relación x_3/R a medida que se avanza la relación muestra valores mayores. La proporcionalidad permite concluir que para las cuencas grandes la calibración favorece el tránsito en canales y en cuencas pequeñas es más representativo el almacenamiento en el suelo.

De acuerdo a la tabla 6, considerar como un parámetro el factor ϕ para la distribución de Pr ,

muestra valores entre 0.6 y 0.9 y los criterios de eficiencia muestran una ganancia marginal que no justifica aumentar el modelo GR4J a 5 parámetros.

7. CONCLUSIONES

El modelo GR4J representa satisfactoriamente la serie de caudales diarios, especialmente la tendencia de estos y los caudales mínimos para análisis de sequías. Los valores de los criterios de eficiencia se encuentran entre el 50 y 100%, lo que muestra el potencial del modelo para calibrarlo y usarlo en nuestro medio. También el

modelo presentó un desempeño adecuado en las estaciones cuya serie de caudales estaba afectada por los caudales de agua residual provenientes de la zona urbana.

Dada su sencillez, el modelo GR4J es de fácil implementación, caso contrario al que puede presentarse con modelos muy robustos puesto que es difícil tener control total sobre todas las variables y parámetros. Un modelo como el GR4J con sólo 4 parámetros facilita cualquier procediendo de optimización de parámetros.

Los resultados obtenidos en el presente estudio, permitirán en trabajos posteriores simular caudales en zonas dentro de la cuenca del río Aburrá, que posean características geomorfológicas y climáticas similares a las de una o varias de las cuencas calibradas. De esta forma se podrán analizar escenarios climáticos probables y reconstrucción de caudales en sitios con escasez de información.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BARCO, J. et al. 2000. Estimación de la evaporación en Colombia. Revista Avances en Recursos Hidráulicos, num. 7, noviembre. 43- 48 p.
- [2] CARDONA, C. M. 1996. Metodología de pronóstico de caudales con base en modelos lluvia-escorrentía aplicados a las subcuencas del embalse la Esmeralda – Central Chivor. Posgrado en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional, 94 p.
- [3] CHANG, F. J. and Y. C. CHEN. 2001. A counterpropagation fuzzy-neural network modeling approach to real time streamflow prediction. Journal of Hydrology, p 245, 153-164.
- [4] CHÁVES, BERNARDO y JARAMILLO, ALVARO. 1999. Regionalización de la temperatura del aire en Colombia. Revista Avances en Recursos Hidráulicos, num. 6, sept. p 37-42.
- [5] LOPERA; M. y LOPERA, J. A. 1984. Modelos estocásticos para representar el proceso lluvia-escorrentía. Trabajo dirigido de grado, Universidad Nacional, 172 p.
- [6] LÓPEZ, L. F. 1987. Representación funcional y medida de la linealidad de sistemas lluvia – escorrentía. Tesis de maestría, Posgrado en Recursos Hidráulicos, 141 p.
- [7] SALAZAR, J. E. et al. 1998. Predicción de caudales diarios para el sector eléctrico colombiano. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México, Asociación Mexicana de Hidráulica; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, varios volúmenes.
- [8] PERRIN, C., MICHEL C., ANDREASSIAN, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology p 279, 275-289.
- [9] UNAL- UDEA- UDEM- UPB, 2004. Diseño y puesta en marcha de la red de monitoreo ambiental en la cuenca hidrográfica del río Medellín en jurisdicción del área metropolitana, Componente hidráulica e hidrológica. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Trabajo dirigido de grado. Facultad de minas. Ingeniería Civil. Medellín. 136 p.
- [10] UNAL-EPM. 1998. Revisión de los modelos de pronóstico de caudales a corto plazo: Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, 95 p.
- [11] UNAL-ISA, 1995. Metodología de pronóstico de caudales en los ríos con aprovechamiento actual o futuro del Sector Eléctrico Colombiano. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, 142 p.
- [12] VÉLEZ, J. I. 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 266 p.