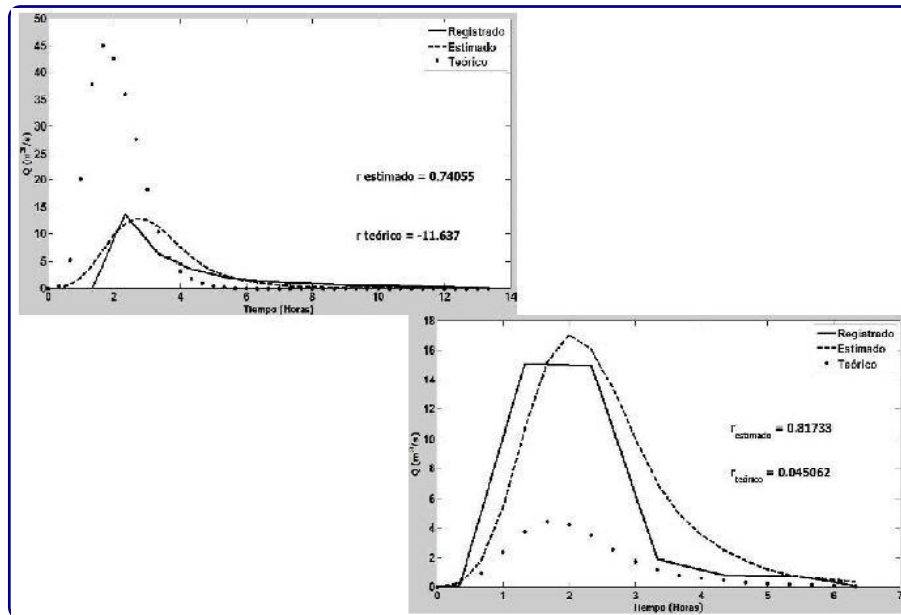


ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MODELOS HIDROLÓGICOS BAJO UN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD E INCERTIDUMBRE

BEHAVIOR OF HYDROLOGIC MODELS UNDER SENSITIVITY AND UNCERTAINTY ANALYSIS



RESUMEN

La reducción de la incertidumbre en la modelación hidrológica está relacionada directamente con la selección del valor apropiado de los parámetros de cada modelo. Este artículo se centra en identificar, mediante un análisis de sensibilidad e incertidumbre, la influencia de los parámetros del modelo del Soil Conservation Service (SCS) en la estimación de hidrogramas de escorrentía superficial empleando los hidrogramas unitarios de Snyder, Clark y el SCS. Para realizar el análisis se utilizó la metodología GLUE, incluida en el Toolbox MCAT. Los resultados obtenidos permiten evidenciar las mejores combinaciones entre los modelos considerados y demostrar que las recomendaciones empleadas en la vida práctica para estimar los parámetros, no describen los comportamientos registrados de las cuencas Colombianas. Se recomiendan algunas relaciones matemáticas orientadas a la disminución de esta incertidumbre.

Andrés Vargas, M.Sc.

Profesor Asistente.

Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá - Colombia,

avargas1@javeriana.edu.co

Juan C. Monroy. Ing.

Pontificia Universidad Javeriana

Bogotá - Colombia

juan.monroy@javeriana.edu.co

*Recibido: 4 Agosto 2011 *Aceptado 2 Septiembre 2011

PALABRAS CLAVE

Modelación hidrológica, hidrogramas unitarios, incertidumbre.

ABSTRACT

The uncertainty reduction in hydrologic modeling is directly related with the selection of the appropriate value of model parameters. This paper focuses on identifying, through a sensitivity and uncertainty analysis, the influence of Soil Conservation Service (SCS) model parameters in estimating runoff hydrographs using SCS, Snyder and Clark unit hydrographs. In order to accomplish the analysis the GLUE methodology was used, included in the MCAT Toolbox. The results highlight the best possible combinations between the considered models and show that the parameters used in practice do not describe the actual behavior of Colombian watersheds. Some mathematical relationships are recommended to reduce this uncertainty.

KEYWORDS

Hydrologic modeling, unit hydrographs, uncertainty.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de desastres naturales en el mundo, está íntimamente relacionada con el comportamiento del agua dentro de una cuenca hidrográfica. Ésta pasa por procesos hasta que cierta porción del agua que llega a las cuencas por la precipitación, sale en forma de escorrentía superficial. Por lo tanto, es de gran importancia predecir los efectos de las crecientes generadas en las zonas que puedan afectar a la población o sus bienes Singh, Woolhiser, (2002).

En Colombia, los estudios de los procesos hidrológicos que ocurren en cuencas hidrográficas son pobres, por lo tanto, surge la necesidad de emplear modelos generados en otros países. El método del Soil Conservation Service SCS, (1959), es el más utilizado en nuestro país para estimar la precipitación de excesos, empleando

información de precipitación total, tipo y uso del suelo.

Conjuntamente con la estimación de la precipitación de excesos es necesario utilizar una función de transferencia, que permita transformar los datos de precipitación de excesos en escorrentía superficial. La metodología más empleada en la práctica para realizar esta transformación consiste en la aplicación de la teoría del Hidrograma Unitario; por tal motivo, para el análisis de hidrogramas de escorrentía superficial realizado en este trabajo se emplearán los hidrogramas unitarios de uso más frecuente en el diseño hidrológico: los del SCS, Snyder y Clark.

Con el fin de evaluar la sensibilidad e incertidumbre de los parámetros empleados por estos modelos, en el presente trabajo se empleará el Toolbox de Análisis de Monte Carlo (MCAT, Wagener et al., 1999, 2002) en tres cuencas del departamento del Valle del Cauca pertenecientes a los ríos Yumbo (13.45 km²), Lili (17.24 km²) y Meléndez (40.21 km²).

2. MATERIALES Y METODOS

La selección de las cuencas consideradas en el estudio (Yumbo, Lili y Meléndez) se realizó con base en su tamaño (con el fin de evitar variaciones sustanciales de la precipitación) y en la disponibilidad de la información. Estas cuencas se localizan en cercanías de la ciudad de Cali, en el Departamento del Valle del Cauca. En la Figura 1, se presenta la localización de las mismas.

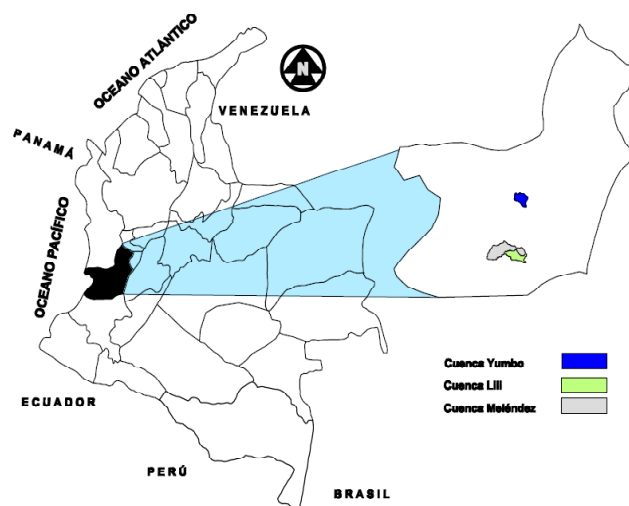


Figura 1. Localización de las cuencas empleadas

Información cartográfica

Se realizó la digitalización de planchas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en escala 1:25.000. Con el fin de obtener la información morfométrica de las cuencas seleccionadas.

Información hidrológica

Dentro del proceso de selección de las cuencas consideradas se verificó que cada una de ellas contara con una estación pluviográfica y una limnigráfica. A partir de la información diaria de éstas cuencas se seleccionaron diferentes eventos extremos con resolución temporal de 10 o 20 minutos, según el caso.

A los eventos previamente seleccionados se les realizó un proceso de depuración verificando la magnitud del caudal, la forma del hidrograma y la duración a considerar. Posteriormente se les descontó el flujo base por medio del método de la línea recta.

El número de eventos que se obtuvo para las cuencas Yumbo, Lili y Meléndez fue de 27, 19 y 29; sin embargo, después de realizar el proceso de depuración (dependiente de la calidad de la información y las magnitudes de los mismos) se consideraron 10, 15 y 18 eventos, respectivamente.

Cálculo de la precipitación de excesos

Modelo comúnmente conocido como el método del número de curva (CN) cuyo objetivo es calcular las abstracciones de agua de una tormenta. En este método la precipitación de excesos (profundidad de escorrentía superficial) es una función de la precipitación total registrada en la cuenca, de un parámetro de abstracción (λ) y del número de curva (CN).

De acuerdo con los estudios realizados por el SCS se cuenta con las siguientes ecuaciones (Beven, 2004):

$$P_e = \frac{(P_r - \lambda S_{Máx})^2}{P_r + (1 - \lambda) S_{Máx}} \quad (1)$$

Donde P_e es la precipitación de excesos (mm), la precipitación total (mm), (λ) una fracción de la retención máxima perdida inicialmente y $S_{Máx}$ el volumen de retención máxima (mm). Generalmente, la fracción de la

retención máxima perdida inicialmente se considera igual al 20%. En el presente estudio dicha fracción se incluirá dentro del análisis; por lo tanto en éste modelo se considerará la variación de dos parámetros, (λ) y CN .

Hidrogramas Unitarios (HU)

De los hidrogramas unitarios (HU's) más utilizados en Colombia, los que se van a emplear en combinación con el método de abstracciones del SCS serán: el HU del SCS (1950), el HU de Snyder (1938) y el HU de Clark (1945) (Chow et al., 1988).

Cada hidrograma unitario emplea diferentes características morfométricas y considera varios parámetros para calcular los hidrogramas de escorrentía superficial. En el caso del HU del SCS se tiene un solo parámetro, el tiempo de rezago (Lag Time – T_l). Una de las metodologías más utilizadas para realizar el cálculo del tiempo de rezago es la siguiente (Hoggan, 1997):

$$T_l = 0,60T_c \quad (2)$$

Otra de ellas, realizada por el SCS (Beven, 2004) es:

$$T_l = \frac{l^{0,8} [25400 - 22,86(CN)]^{0,7}}{14104(CN)^{0,7} S_l^{0,5}} \quad (3)$$

Donde l es la longitud axial (m) y S_l la pendiente de ladera (%).

Para el HU de Snyder se tienen dos parámetros, C_p y C_r , y para el HU de Clark los parámetros son el tiempo de concentración (T_c) y el coeficiente de almacenamiento (K).

Aplicación y calibración de los Modelos

La modelación hidrológica que se realizó en este trabajo consistió en combinar el modelo del SCS con cada uno de los HU's considerados hasta obtener el mejor conjunto de parámetros en cada evento. Para el modelo del SCS se considerarán dos situaciones una en la que (λ) tiene un valor constante (e igual a 0,20); y otra en la que este parámetro es variable.

De acuerdo con lo anterior, las simulaciones realizadas consideran la combinación de las dos alternativas des-

critas. En la Tabla 1 se presentan los escenarios considerados.

Tabla 1. Escenarios para cada cuenca

Combinación	Método del SCS (λ)	Hidrograma Unitario (HU)	Parámetros del HU
1	0,20	SCS	T_f
2	Variable		$CN\lambda, T_f$
3	0,20	Snyder	C_b, C_p
4	Variable		CN, λ, C_b, C_p
5	0,20	Clark	K, T_c
6	Variable		$CN\lambda, K, T_c$

El ajuste y la calibración para cada evento de las cuencas consideradas y las combinaciones presentadas en la Tabla 1 se realizaron por medio del Monte Carlo Analysis Toolbox (MCAT).

Monte Carlo Analysis Toolbox (MCAT)

El Toolbox de Análisis de Monte Carlo, es una librería desarrollada en Matlab que contiene herramientas de análisis visual y numérico para la evaluación de modelos matemáticos en general (Wagener et al., 1999, 2002).

Dentro de este Toolbox se encuentra incluida la metodología conocida como GLUE, Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (Beven y Binley, 1992); la cual funciona bajo el supuesto de que no existe un solo parámetro óptimo que sea identificado, sino que por el contrario, un conjunto de parámetros son identificados donde cada modelo tiene una probabilidad de certeza de representar correctamente el sistema.

La metodología GLUE introduce el término de probabilidad como una medida del rendimiento para diferenciar que tan probable es que un modelo genere resultados que describan adecuadamente el comportamiento del sistema en estudio.

La entrada al MCAT es el resultado de un muestreo de Monte Carlo, del espacio paramétrico del modelo en consideración.

Esta herramienta ha sido empleada en la investigación de la modelación lluvia-escorrentía (Wagener et al.,

2001, 2004), del transporte de solutos en cauces naturales (Wagener et al., 2002), de la modelación de la calidad del agua (Sincok et al., 2003), y de la modelación de la transferencia del fósforo a escala de cuenca (Smith & Wheeler, 2004; Smith et al., 2005).

La descripción de los componentes del MCAT y la interpretación de sus resultados con casos de estudio pueden consultarse en la literatura (Wagener y Kollat, 2007).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

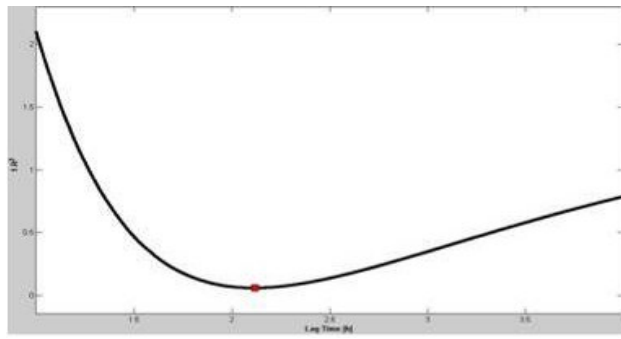
En las tres cuencas consideradas se realizó un análisis de los diferentes eventos y las combinaciones presentadas anteriormente (Tabla 1).

El comportamiento observado en cada combinación fue bastante similar para todos los eventos de las cuencas analizadas, por lo tanto, a continuación sólo se presentan a manera de ejemplo los resultados para el primer evento de la cuenca del río Yumbo, (Figuras 2 a 7).

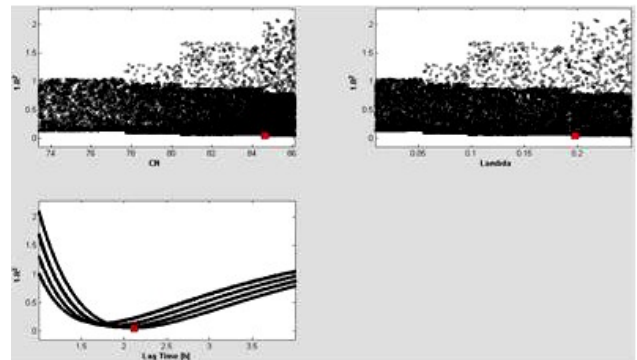
De manera general, las gráficas de respuesta de estas combinaciones se encuentran organizadas de la siguiente manera: en a) se muestra la función objetivo del o los parámetros, en b) se presenta el análisis de sensibilidad; en c) se encuentra la comparación entre el hidrograma registrado y el estimado, y por último, la incertidumbre que presentan los modelos por medio de un análisis de intervalos de confianza GLUE se incluye en d). Adicionalmente, en c) se realiza un análisis del ajuste del modelo estimado con el registrado, por medio de la función de eficiencia propuesta por Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970), descrita por medio de la ecuación 4.

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

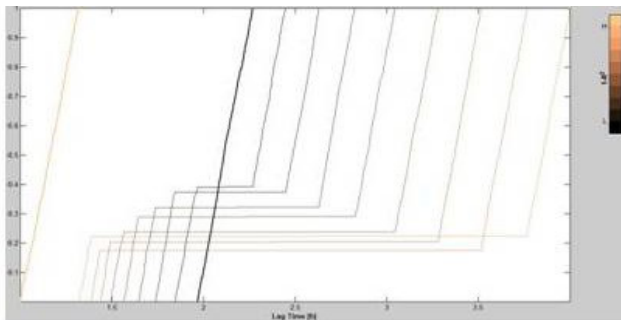
Donde y_i son los valores registrados, \hat{y}_i los valores estimados, \bar{y} la media de los valores registrados, n el número de datos y r el coeficiente de Nash-Sutcliffe.



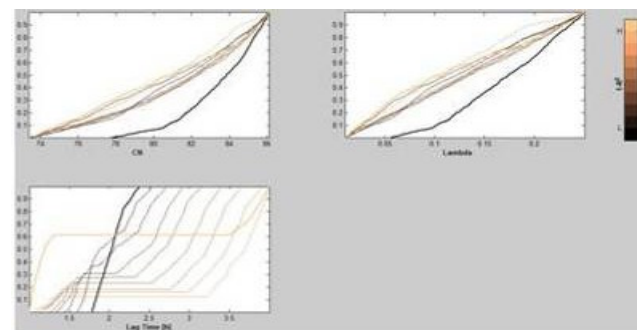
a) Función objetivo



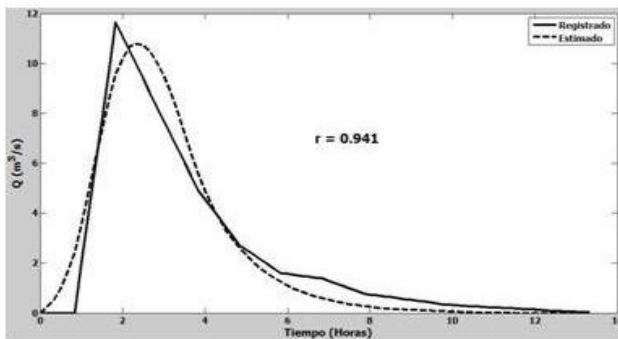
a) Función objetivo



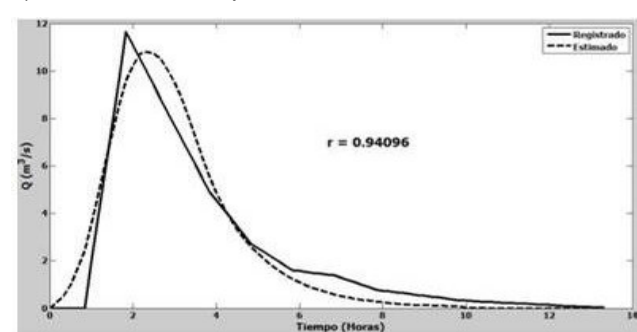
b) Sensibilidad de parámetros



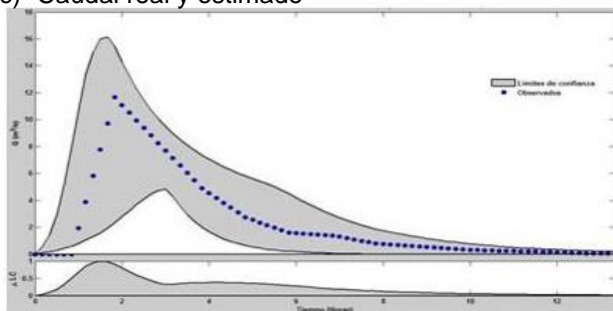
b) Sensibilidad de parámetros



c) Caudal real y estimado

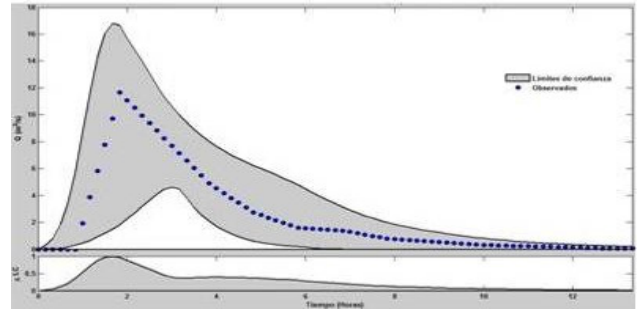


c) Caudal real y estimado



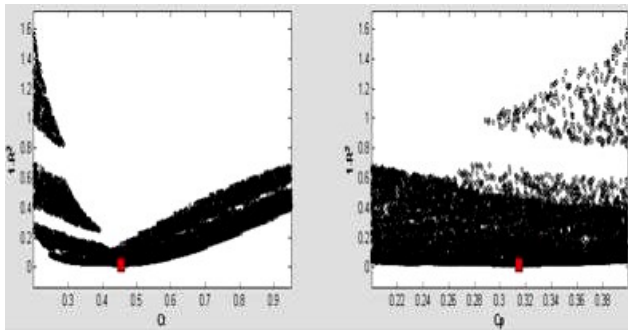
d) Intervalos de confianza

Figura 2. Cuenca del río Yumbo. Resultados evento 1 - combinación 1.

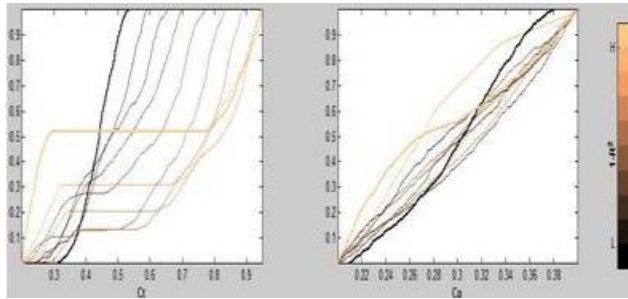


d) Intervalos de confianza

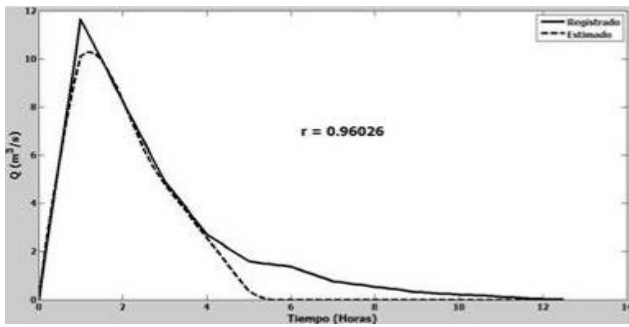
Figura 3. Cuenca del río Yumbo. Resultados evento 1 - combinación 2.



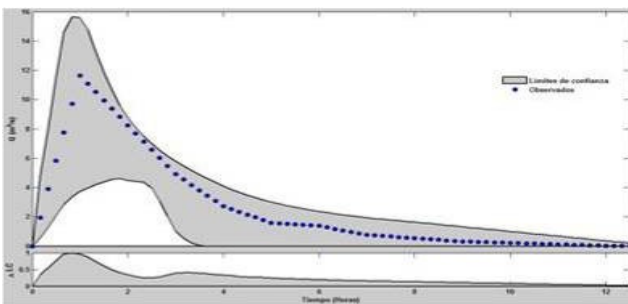
a) Función objetivo



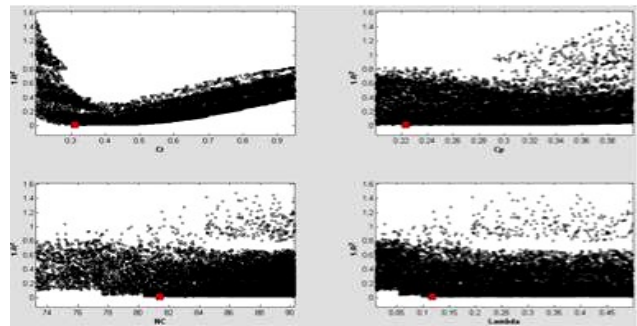
b) Sensibilidad de parámetros



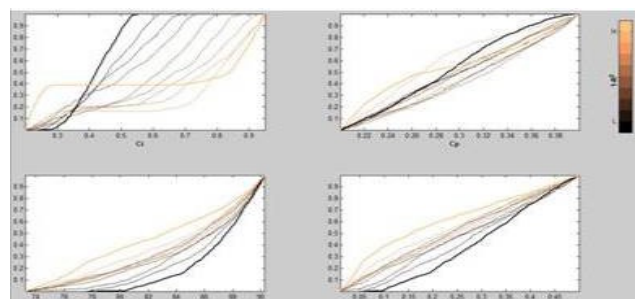
c) Caudal real y estimado



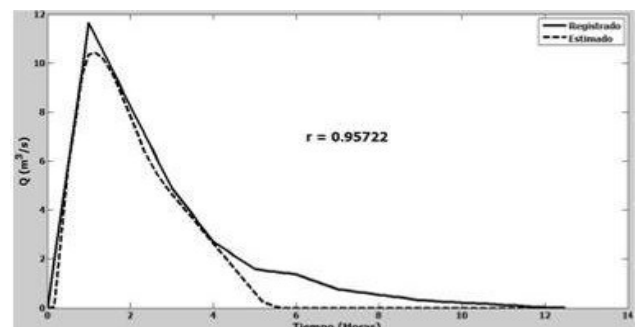
d) Intervalos de confianza



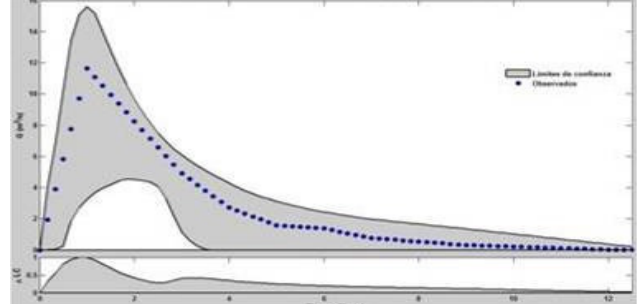
a) Función objetivo



b) Sensibilidad de parámetros



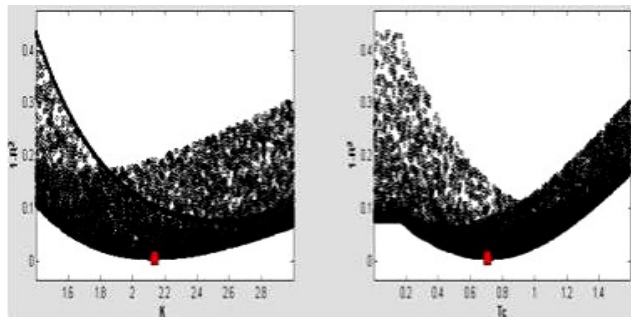
c) Caudal real y estimado



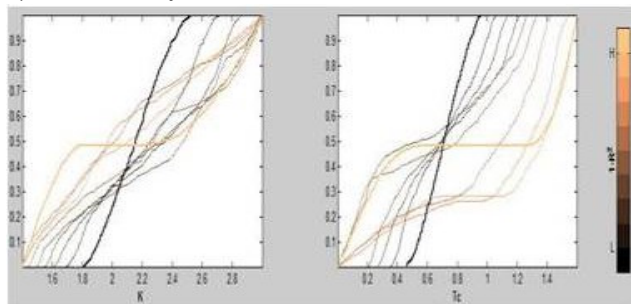
d) Intervalos de confianza

Figura 4. Cuenca del río Yumbo. Resultados evento 1 - combinación 3.

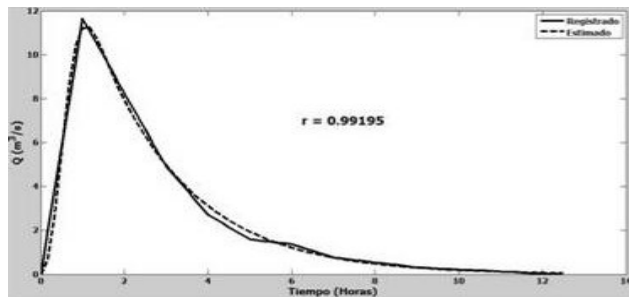
Figura 5. Cuenca del río Yumbo. Resultados evento 1 - combinación 4.



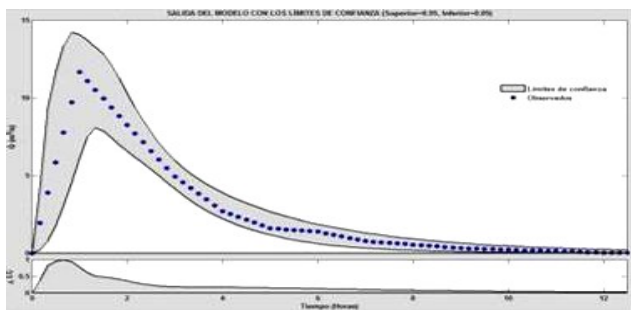
a) Función objetivo



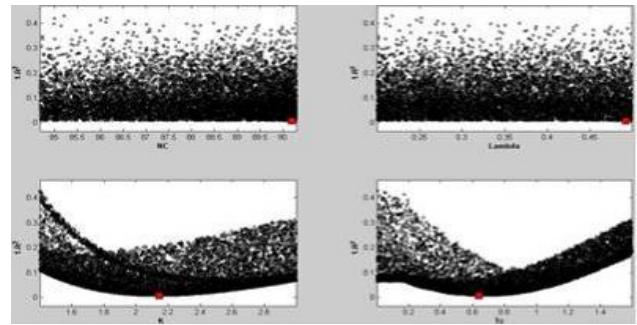
b) Sensibilidad de parámetros



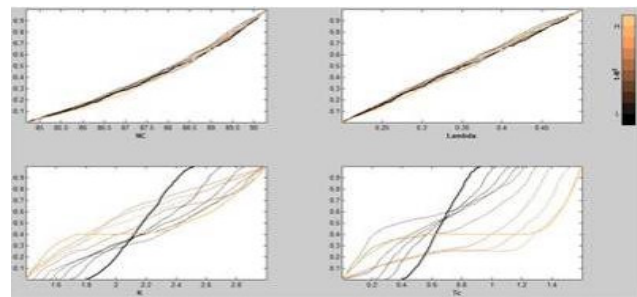
c) Caudal real y estimado



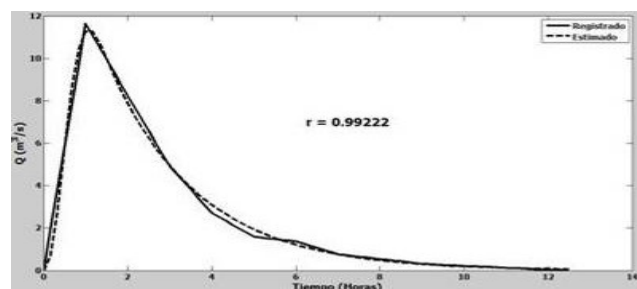
d) Intervalos de confianza



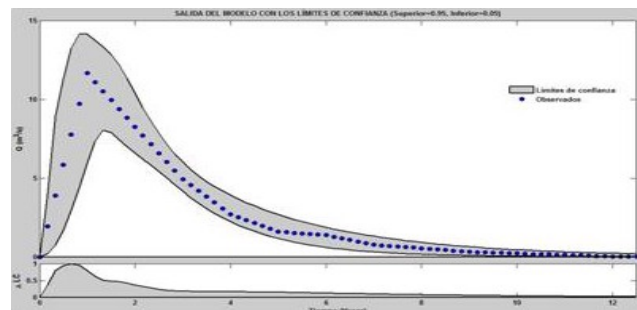
a) Función objetivo



b) Sensibilidad de parámetros



c) Caudal real y estimado

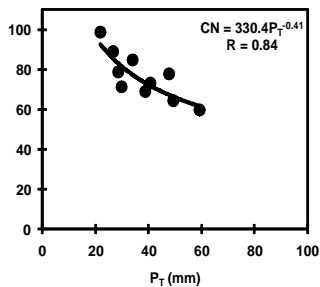


d) Intervalos de confianza

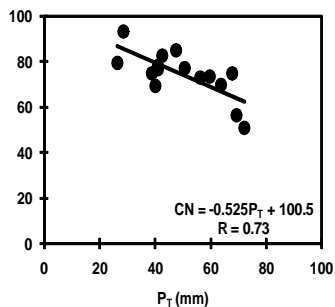
Figura 6. Cuenca del río Yumbo. Resultados evento 1 - combinación 5.

Figura 7. Cuenca del río Yumbo. Resultados evento 1 - combinación 6.

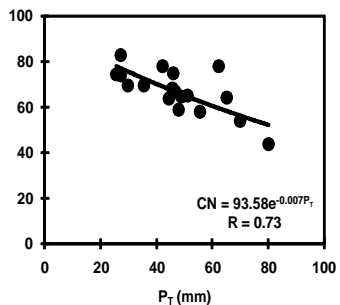
Adicionalmente, se observó que la variación del parámetro λ del modelo de abstracciones del SCS mejora ligeramente



a) Cuenca del río Yumbo



b) Cuenca del río Lili



c) Cuenca del río Meléndez

Figura 8. Relación del número de curva (CN) y la precipitación total.

En la Figura 2 se observa que el parámetro T_I es claramente identificable (En a), debido a que presenta un valor mínimo para el cual el modelo funciona óptimamente; cualquier variación de este parámetro modifica sustancialmente los resultados obtenidos, lo cual permite inferir que este parámetro también es altamente

sensible (véase Figura 2b).

La comparación entre el hidrograma registrado y el estimado mediante el HU del SCS muestra que el caudal generado por este hidrograma da un valor de caudal pico muy cercano al valor registrado (véase Figura 2c), y se ajusta adecuadamente en la mayor parte de la gráfica del caudal observado; por lo tanto, representa adecuadamente las condiciones observadas. Adicionalmente, un coeficiente de Nash-Sutcliffe (r) de 0.941 indica una muy buena correlación entre el caudal registrado y el estimado. En la Figura 2d se observa que la banda de confianza obtenida ampara la mayor parte de los datos.

En la Figura 3 se mantiene el comportamiento de identificabilidad y sensibilidad para el parámetro T_I , mientras que los parámetros CN y λ muestran un bajo nivel de identificabilidad y sensibilidad. Al igual que en la Figura 2, el hidrograma registrado y el estimado son bastante similares, el caudal pico obtenido es cercano al valor registrado, el coeficiente de Nash-Sutcliffe es bueno y la banda de confianza encierra la mayor parte de los datos. análisis de identificabilidad, sensibilidad, ajuste e incertidumbre de los parámetros de las combinaciones 3 a 6, se encontró que los parámetros que dominan la certeza para las diferentes combinaciones son: C_r , C_p , K y T_c . En todas las combinaciones se observó un comportamiento similar para parámetros (λ y CN), que muestran un bajo nivel de identificabilidad y sensibilidad, véanse (Figuras 4 a 7).

Adicionalmente, se observó que la variación del parámetro λ del modelo de abstracciones del SCS, mejora ligeramente el ajuste del modelo con el hidrograma registrado, pero al mismo tiempo se genera una alta interdependencia paramétrica dificultando la identificabilidad de los otros parámetros, por lo tanto se encontró que las mejores combinaciones son aquellas en las que éste parámetro se considera igual a 0,20 (Combinaciones 1, 3 y 5).

En consecuencia de lo anterior, cualquier variación de λ cambia notoriamente el valor del CN, permitiendo que éste parámetro tome valores poco consistentes con las condiciones generalmente observadas en cuencas hidrográficas. Con base en el análisis de los resultados obtenidos para cada cuenca, se encontró que existe una relación entre el número de curva y la precipitación total, (Figura 9). Se realizaron diferentes intentos por establecer el comportamiento de los demás parámetros de los

hidrogramas unitarios, sin embargo, no se encontraron correlaciones que lo describieran de manera clara. A partir de las calibraciones realizadas para cada evento se observó que el HU de Clark es el que mejor representa las condiciones observadas en cada cuenca, los valores de caudal pico y el que menor incertidumbre presenta en las estimaciones, debido a que la banda obtenida a partir de los intervalos de confianza es la más estrecha en comparación con los otros métodos (véanse Figuras 2d, 4d y 6d).

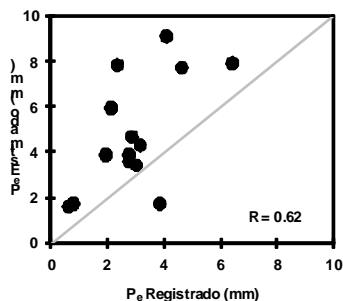
Las ecuaciones obtenidas de las calibraciones realizadas y presentadas en la Figura 8 se emplearon para determinar el número de curva y a partir de éste calcular la precipitación de excesos, mientras que los parámetros de los HU's se estimaron como los promedios de los valores calibrados en cada cuenca.

Tiempo de concentración

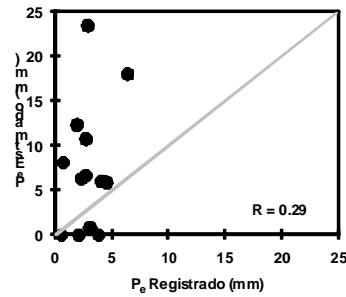
Del análisis de los tiempos de concentración calculados por medio de fórmulas teóricas y los observados para cada evento, se encontró que no hay un solo método empírico que permita obtener con certeza el tiempo de concentración (T_c) para una cuenca hidrográfica. Esto se evidencia debido a que con las fórmulas empíricas sólo es posible encontrar un valor de T_c para cada cuenca, mientras que en la realidad, cada evento de creciente presenta un tiempo de concentración diferente.

De lo anterior se encontró que para Yumbo, Lili y Meléndez las mejores metodologías para obtener el T_c son: SCS Velocidad promedio ($T_c=2,12$ h), Kirpich ($T_c=1,23$ h) y Agencia Federal ($T_c=2,26$ h), respectivamente. Del análisis de los registros, el tiempo de concentración (en horas) para la cuenca de Yumbo varía entre 0,33 y 11,67; para Lili entre 0,33 y 7,67; y para Meléndez entre 0,33 y 10,33.

Método de abstracciones del SCS



a) Valores calibrados



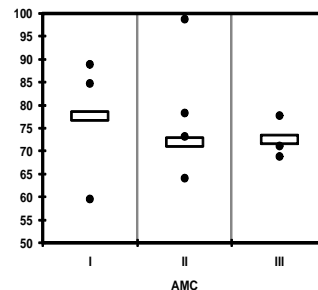
b) Valores literatura

Figura 9. Análisis del ajuste de la precipitación efectiva con el método del SCS.

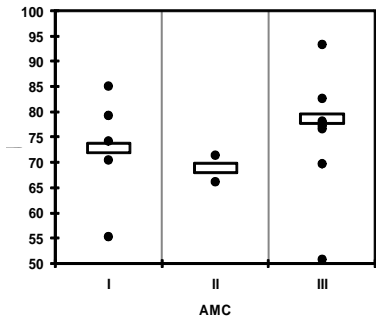
En la Figura 9 se presentan los diagramas de dispersión entre la P_e estimada por el método del SCS y la P_e registrada, comparando los resultados de la P_e estimada cuando se emplean los valores recomendados por la literatura, y los resultados obtenidos después del proceso de calibración. (Considerando $\lambda = 0,20$).

En esta Figura se observa que el ajuste de la precipitación de excesos que se obtiene cuando se emplean los valores obtenidos después del proceso de calibración, es sustancialmente mejor que cuando se emplean los valores recomendados por la literatura.

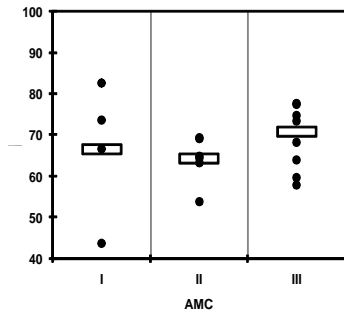
En la Figura 10 se presenta un análisis del número de curva y su relación con el tipo de humedad antecedente de cada evento para las cuencas consideradas, cuando λ es igual a 0,20. Adicionalmente, se observa que en los eventos de creciente pueden obtenerse valores del número de curva relativamente altos para bajas condiciones de humedad (AMC I). Adicionalmente. Se observa que la relación entre las condiciones antecedentes de humedad II y III (normal y saturada) sí se cumplen las condiciones esperadas.



a) Cuenca del río Yumbo

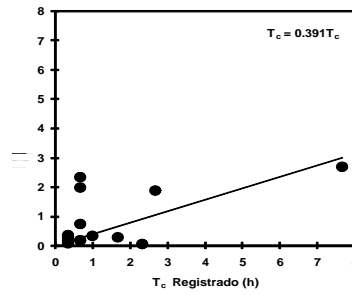


b) Cuenca del río Lili

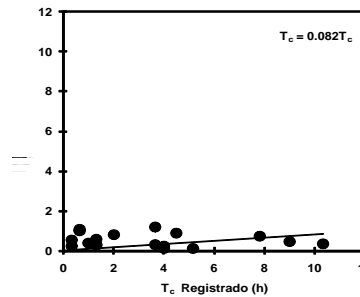


c) Cuenca del río Meléndez

Figura 10. Relación de CN con la humedad antecedente (Considerando el HU de Clark).



b) Cuenca del río Lili



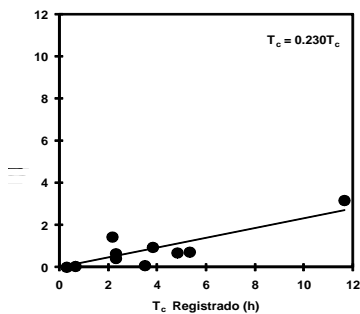
c) Cuenca del río Meléndez

Figura 11. Comparación del T_c y T_l en las cuencas estudiadas.

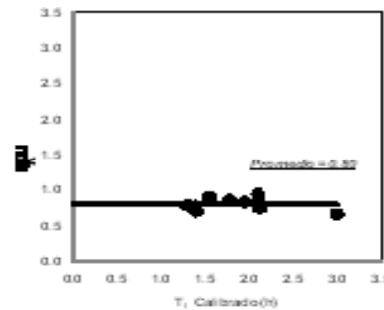
Parámetros de los hidrogramas unitarios

En la Figura 11 se presenta la relación entre el tiempo de concentración y el tiempo de rezago del hidrograma unitario del SCS para las cuencas consideradas. En esta Figura se observa que la condición propuesta en la ecuación [2] no se cumple, debido a que para las cuencas Yumbo, Lili y Meléndez se obtuvo que el T_l es igual al 31%, 52% y 28% del T_c , respectivamente, sin presentarse un ajuste apropiado.

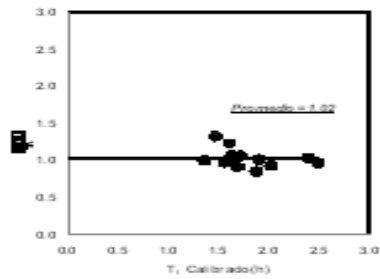
En la Figura 12 se relaciona el tiempo de rezago calibrado por medio del HU del SCS y el tiempo de rezago obtenido por medio de la ecuación [3]. En esta Figura se observa que el rango de variación del tiempo calibrado es mucho mayor que el rango obtenido mediante la ecuación. Adicionalmente, el tiempo de rezago calibrado en la mayoría de los casos tiene valores mucho mayores que los calculados por medio de la fórmula del HU del SCS.



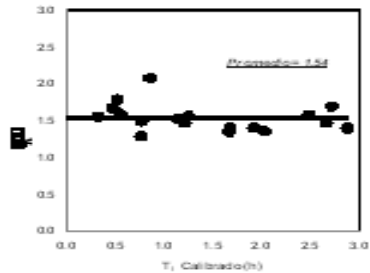
a) Cuenca del río Yumbo



a) Cuenca del río Yumbo



b) Cuenca del río Lili



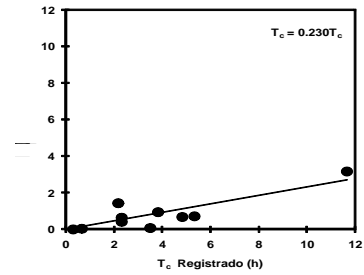
c) Cuenca del río Meléndez

Figura 12. Comparación de T_c calibrado y estimado medio de la ecuación [3].

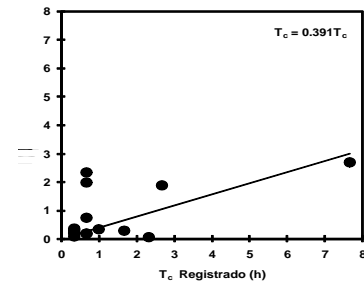
Los intervalos que se recomiendan en la literatura (Chow et al., 1988) para los parámetros C_t (1,35 a 2,65) y C_p (0,56 a 0,69) del hidrograma unitario de Snyder difieren bastante de los obtenidos en este estudio, los cuales varían entre 0,01 y 0,87, y entre 0,04 y 0,95, respectivamente.

En la Figura 13 se realiza una comparación entre el tiempo de concentración registrado y el calibrado en los casos que se consideró el hidrograma unitario de Clark.

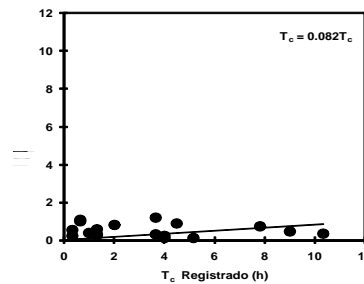
A partir de ésta Figura puede establecerse que el tiempo de concentración calibrado, es menor que el valor registrado para cada cuenca, este aspecto permite evidenciar que dicho parámetro puede no reflejar el sentido físico real de este parámetro.



a) Cuenca del río Yumbo



b) Cuenca del río Lili

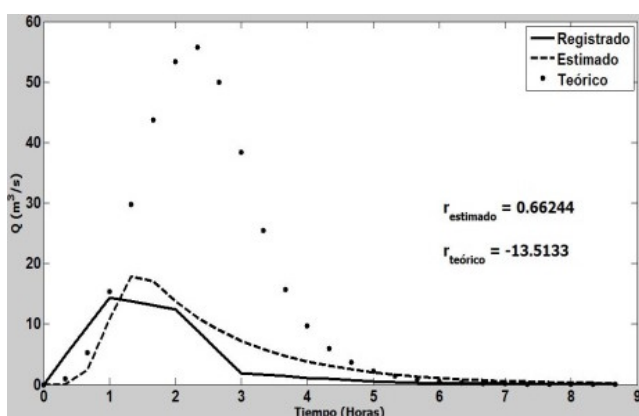
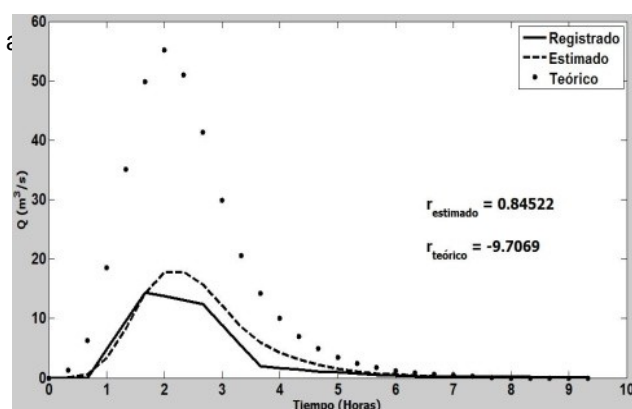
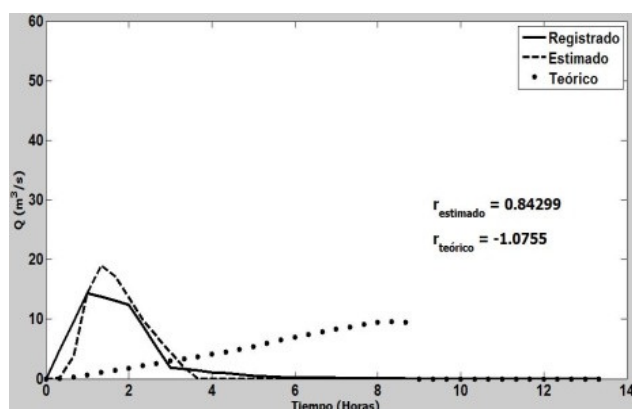


c) Cuenca del río Meléndez

Figura 13. Comparación de T_c calibrado y el registrado en el HU de Clark.

Generación de hidrogramas

En la Figura 14 se presenta un análisis comparativo de los hidrogramas de escorrentía calculados mediante los modelos ajustados, con respecto a los que se obtendrían utilizando los parámetros sugeridos por la literatura; este análisis se realiza para el evento 15 de la cuenca Meléndez. Con base en esta figura, se puede observar la importancia que tiene el proceso de calibración en la estimación de la escorrentía superficial, donde se muestra claramente que los valores recomendados por la literatura no generan hidrogramas que se ajusten adecuadamente al comportamiento observado en las cuencas estudiadas.



c) HU de Clark

Figura 14. Comparación del ajuste para el evento 15 de la cuenca Meléndez.

4. CONCLUSIONES

Con base en el comportamiento observado de los hidrogramas estimados en comparación con los hidrogramas registrados, se puede concluir que los hidrogramas unitarios de Snyder, Clark y del SCS, de manera general representan adecuadamente la forma de los hidrogramas registrados.

La variación del parámetro λ del modelo de abstracciones del SCS mejora ligeramente el ajuste del modelo con el hidrograma registrado, pero al mismo tiempo genera una alta interdependencia paramétrica dificultando la identificabilidad de los parámetros de los HU's, por lo tanto se encontró que las mejores combinaciones son aquellas en las que éste parámetro se considera igual a 0,20. Adicionalmente, cuando se modifica el parámetro λ se cambia sustancialmente el valor del CN, obteniendo en muchas ocasiones valores erróneos de éste parámetro.

En la estimación de la escorrentía superficial en las cuencas analizadas, el hidrograma unitario de Clark es el que mejor se ajusta a la forma de los hidrogramas registrados, al caudal pico, y el que presenta la menor incertidumbre.

No existe un solo método empírico para obtener con certeza el tiempo de concentración, los métodos empíricos determinan un solo valor de tiempo de concentración para una cuenca, pero en la realidad para cada evento existe un tiempo de concentración diferente, observando rangos de variación bastante amplios.

El análisis comparativo de los hidrogramas de escorrentía y la discusión presentada en este trabajo permiten establecer la importancia que tiene el proceso de calibración en la modelación hidrológica. Éste aspecto permite identificar que la adaptación de los modelos de otras regiones del planeta a las condiciones de nuestro país constituye una importante brecha en el conocimiento del manejo de nuestros recursos hídricos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ingeniero Héctor Fabio Aristizábal y al grupo de recursos hídricos de la Corpo-

ración Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, por el apoyo y suministro de la información hidrológica necesaria durante todo el proceso de estudio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beven, K.J. (2004). Rainfall-runoff modelling. England: John Wiley and Sons,
- Beven, K.J.; y Binley, A.M. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, Vol. 6, 279–298.
- Chow, V.T.; Maidment, D.R. y Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology International ed.* New York: McGraw Hill Higher Education.
- Hoggan, D.H. (1997). *Computer-assisted floodplain hydrology and hydraulics.* New York: McGraw-Hill.
- Nash, J.E. y Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3): 282–290.
- Sincock, A.M.; Wheeler, H.S., Whitehead; P.G. (2003). Calibration and sensitivity analysis of a river water quality model under unsteady flow conditions. *Journal of Hydrology*, 277 (3-4), 214-229.
- Singh, V.P. y Woolhiser; D.A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292
- Smith, R.M.S.; Evans, D.J., Wheeler; H.S. (2005). Evaluation of two hybrid metric-conceptual models for simulating phosphorus transfer from agricultural land in the river Enborne, a lowland UK catchment. *Journal of Hydrology*, 304 (1-4), 366-380.
- Smith, R.M.S.; Wheeler, H.S. (2004). Multiple objective evaluation of a simple phosphorus transfer model. *Hydrological Processes*, 18 (9), 1703-1720.
- Soil Conservation Service [SCS] (1959). Supplement A, Section 4, Chapter 10, Hydrology. In USDA. (eds.) *National engineering handbook.* Washington, D.C: University of Michigan Library.
- Wagener, T.; y Kollat, J. (2007). Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox. *Environmental Modelling & Software*, 22(7): 1021-1033.
- Wagener, T.; Boyle, D.P.; Lees, M.J.; Wheeler, H.S., Gupta; H.V., Sorooshian; S. A. (2001). Framework for development and application of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5 (1), 13-26.
- Wagener, T.; Lees, M.J. y Wheeler, H.S. (1999). A generic rainfall-runoff modeling toolbox. *Eos Trans, AGU 80(17), Fall Meet. Suppl.*, F203.
- Wagener, T.; Lees, M.J. y Wheeler, H.S. (2002). A toolkit for the development and application of hydrological models. In Singh, V.P. Y Frevert, D.K. (eds.) *Mathematical models of large watershed hydrology.* USA: Water Resources Publications LLC, 91-140.
- Wagener, T.; Wheeler, H.S. y Gupta, H.V. (2004). *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments.* London: Imperial College Press.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.