



Evaluación del modelo de hidrograma unitario SCS en la determinación de caudales máximos en cuencas de Norte de Santander

Evaluation of SCS - unit hydrograph model to estimate peak flows in watersheds of Norte de Santander

Leonardo Vargas-Garay^a, Oscar David Torres-Goyeneche^b, Gustavo Adolfo Carrillo-Soto^{c*}

^aIngeniero Civil, leonardovg@ufps.edu.co, orcid.org/0000-0003-4782-8975, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

^bIngeniero Civil, oscar davidt@ufps.edu.co, orcid.org/0000-0003-4593-1987, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

^{c*}Doctor en Hidrología, gustavocarrillo@ufps.edu.co, orcid.org/0000-0001-6772-4431, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

Cómo citar: L. Vargas-Garay, O.D. Torres Goyeneche y G.A. Carrillo-Soto, "Evaluación del modelo de hidrograma unitario SCS en la determinación de caudales máximos en cuencas de Norte de Santander", *Respuestas*, vol. 24, no. 1, pp. 6 - 13, 2019. doi:10.22463/0122820X.1323

Recibido: Mayo 15, 2018; Aprobado: Noviembre 21, 2018.

RESUMEN

Palabras Clave:

Caudales máximos
Hidrograma Unitario Sintético
Hidrología
SCS

En diversos estudios es necesario determinar la magnitud de caudales extremos en un río. Disponiendo de un adecuado registro histórico de caudales es posible ajustar una función de densidad de probabilidad (fdp) que permita estimar eventos asociados con un alto periodo de retorno (i.e. 100 años). En cuencas no-instrumentadas, como son la mayoría de cuencas en el mundo, se recurre a otras metodologías como por ejemplo el Hidrograma Unitario Sintético propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos – USA (HU-SCS). Se evaluó el modelo HU-SCS en cuencas del departamento Norte de Santander (COL), en su capacidad para estimar caudales extremos, y explorar su posible regionalización. La evaluación se realiza mediante la comparación de estimaciones de Q100, mediante el método de Factores de Frecuencia y el modelo HU-SCS. Series temporales de caudal y precipitación se obtuvieron de la red IDEAM, seleccionando 19 cuencas en función de su área de drenaje, densidad de estaciones climatológicas y longitud del registro, caracterizadas geomorfológicamente utilizando ArcMap™ sobre el modelo digital de elevación ASTER-GDEM. Utilizando información disponible sobre geología, suelos, cobertura vegetal, y asumiendo una condición antecedente de suelo húmeda (AMC-III) se obtuvieron valores de la mediana del error relativo Q100 (ϵ -Q100) de +507% y +406%, para las fdp Gumbel y Log-Pearson. Para una condición antecedente de suelo seca (AMC-I) ϵ -Q100 bajo a +36% y +17%. Fue posible minimizar ϵ -Q100 mediante calibración del parámetro Número de Curva (CN). No se encontró una función de regionalización satisfactoria para CN. Aplicando SCS-HU para condición AMC-III se sobreestima en gran medida el Q100. Es posible minimizar el error al considerar AMC-I y reducir CN, situación contra-intuitiva pues caudales extremos se asocian con condiciones meteorológicas húmedas (i.e. Año Niña). Se debe investigar mejoras en la caracterización de la lluvia y suelos en Norte de Santander.

ABSTRACT

Keywords:

Physical Activity
Condition
Effort
Health

In several studies it is necessary to determine the magnitude of extreme flows in a river. Having an adequate register of observed discharge it is possible to adjust a probability density function (fdp) that allows estimating events associated with a high return period (i.e. 100 years). In ungauged basins, such as the majority of basins in the world are, other methodologies are used, such as the Synthetic Unity Hydrograph proposed by the United State Soil Conservation Service (UH-SCS). The UH-SCS model was evaluated in watersheds of the Norte de Santander department (COL), in its capacity to estimate extreme flows, and to explore its possible regionalization. The evaluation is done by comparing estimates of Q100, using the Frequency Factors method and the UH-SCS model. Discharge and precipitation time series were obtained from the IDEAM network, selecting 19 basins based on their drainage area, climatological stations density and records length. Geomorphology was characterized using ArcMap™ on the ASTER-GDEM digital elevation model. Using information available on geology, soils, vegetation cover, and assuming a wet antecedent moisture condition (AMC-III), values of the median of relative Q100 error (ϵ -Q100) of + 507% and + 406% were obtained for the fdp Gumbel and Log-Pearson. Using dry antecedent moisture condition (AMC-I) ϵ -Q100 low to + 36% and + 17%. It was possible to minimize ϵ -Q100 by calibrating the Curve Number (CN) parameter. A satisfactory regionalization function for CN was not found. Applying SCS-HU under AMC-III condition, Q100 is greatly overestimated. It is possible to minimize the error by considering AMC-I and reduce CN, a counter-intuitive situation since extreme flows are associated with wet weather conditions (i.e. Año Niña). Improvements in the characterization of rainfall and soils in Norte de Santander should be investigated.

Introducción

La gestión de los recursos hídricos es fundamental para la planeación y el manejo sostenible del medio ambiente en un país como Colombia que cuenta con una alta biodiversidad en gran parte de su extensión geográfica. El estudio y conocimiento de la hidrología, por lo tanto, juega un papel importante para la identificación de reservas hídricas, la determinación de demandas y suministros de agua potable y

garantizar la calidad de esta, así como la protección de sus fuentes, y específicamente para predecir la ocurrencia de fenómenos de frecuencia extrema (crecientes y sequías).

Un estudio hidrológico aborda el problema de una región a través de una cuenca, debido a que representa la unidad física del área y en donde la entrada es un evento de precipitación y la salida es el escurrimiento superficial, en este proceso toman gran importancia factores de influencia como la cobertura de

*Autor de correspondencia.

E-mail: gustavocarrillo@ufps.edu.co (Gustavo Adolfo Carrillo Soto)

Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC-ND



vegetación, el tipo de suelo, el área y la topografía de la zona en estudio. En el proceso de diseño de obras hidráulicas e infraestructura vial, un requisito fundamental es la determinación de la magnitud de los eventos hidrológicos que puedan presentarse con cierta frecuencia para valores extremos o máximos durante un período determinado, por ejemplo: el Q_{100} , el cual corresponde al caudal máximo para un período de retorno de cien años, y es el de más amplio uso en el diseño hidrológico.

Ahora bien, al no contar con datos históricos de caudal en la mayor parte de las cuencas hidrográficas del país (Cuencas No-Instrumentadas), estos caudales se pueden deducir por medio de modelos hidrológicos, que se han desarrollado, mediante formulación empírica, denominados como hidrogramas unitarios sintéticos, los cuales estiman el escurrimiento superficial con base en las características morfométricas de las cuencas en estudio. Básicamente estos modelos consisten en la relación de los parámetros propios del método, con los procesos hidrológicos que se producen en la cuenca; estos modelos han sido calibrados en la geografía de los países en donde fueron desarrollados, para establecer sus parámetros, por tal razón existe incertidumbre en la aplicación de estos modelos hidrológicos en la región, debido a que los valores de los parámetros se escogen de manera subjetiva.

Materiales y métodos

Información utilizada

La información utilizada la conforman la serie histórica de caudales máximos anuales para 19 estaciones con al menos 19 años de registro y los datos de precipitación en las estaciones representativas del área de estudio en el departamento Norte de Santander, obtenidos a través del trámite de solicitud de parámetros hidrometeorológicos de la base de datos del IDEAM. Además, se utilizó para la caracterización morfológica de las cuencas el modelo digital de elevación ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model). La caracterización de las cuencas se realizó a partir de la cartografía básica elaborada por el IGAC en formato geodatabase. También se requirió información sobre las coberturas y usos del suelo, para lo cual se obtuvo del IDEAM el mapa de coberturas de la tierra, escala 1:100.000, según la metodología CORINE (Coordination of Information on the Environmental) Land Cover adaptada para Colombia [1]. Y el Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento Norte de Santander elaborado por el IGAC, esta publicación consta de una memoria técnica y un mapa escala 1:100.000 de las unidades cartográficas de suelos [2].

Metodología

Inicialmente se realizó la caracterización morfométrica de las cuencas seleccionadas, mediante el uso de herramientas de

geoprocamiento en el software ArcGIS®. En la Tabla I se presenta la información más importante de las estaciones del Ideam y las características geomorfológicas de cada una de las cuencas. A partir del criterio de área de drenaje menor a 1000 km² se realizó la aplicación del HU-SCS, considerándolo como un rango prudente para emplear este modelo, señalando también que el Soil Conservation Service no establece una restricción en cuanto al límite de área de drenaje de una cuenca para la aplicación del método. En la Figura I se muestra la ubicación y distribución espacial de las cuencas estudiadas.

Tabla I. Información de las estaciones y características morfométricas de las cuencas.

Estación Ideam	Código	Corriente	Altitud	Período de Registro	No Años de Registro	A	Y	I	L	S
			[mm]			[Km ²]	[%]	[Km]	[Km]	[m/m]
El Campanario	16057060	Qda Campanario	1440	1979-2001	21	21.45	33.7	9.86	7.33	0.10
La Cabrera	16057070	Qda El Molino	1400	1979-2001	22	24.69	43.0	16.66	13.72	0.14
La Soledad	16057050	Qda La Soledad	1460	1979-2001	21	27.00	28.2	11.85	9.27	0.15
Berlín	37017010	Jordán	3330	1972-2000	27	48.63	20.8	16.15	10.52	0.04
Las Vegas	16057010	Frio	1420	1972-2014	38	69.84	36.1	21.63	16.82	0.14
Los Pomarrosos	16027010	Salazar	850	1988-2014	26	101.00	67.2	24.07	17.76	0.20
Marcelita	16057020	Oroque	1380	1972-2006	35	105.76	31.5	29.38	23.15	0.17
Campo Seis	16037040	Tibú	70	1973-2014	41	314.60	36.0	37.29	25.70	0.12
Pte Abrego	16047010	Tarra	1430	1971-2014	44	367.35	40.7	40.34	28.91	0.08
Pte Capira	16027300	Zulia	1320	2004-2015	12	391.57	45.8	53.38	33.06	0.14
Pte San Miguel	16037050	San Miguel	75	1984-2014	31	410.52	19.9	48.83	38.58	0.05
La Donjuana	16017020	Pamplonita	730	1973-2014	42	422.69	45.3	53.35	38.84	0.09
Cornejo	16027100	Peralonso	270	1969-2014	45	460.80	45.8	61.18	51.48	0.12
La Cabaña	16057030	Algodonal	1220	1971-2014	44	530.78	31.1	57.23	39.40	0.06
El Hoyo	23197410	San Alberto	77	1974-2015	39	604.11	36.0	68.36	56.53	0.06
Campo Tres	16037010	Nuevo Presidente	50	1972-2014	43	706.20	34.8	64.77	56.50	0.08
El Cincho	16047030	Tarra	1090	1981-1999	19	722.07	43.2	72.35	60.45	0.27
Pte López	37017040	Chitagá	1862	1973-2014	42	834.05	38.1	58.36	42.58	0.15
Pte Sardinata	16037030	Sardinata	245	1973-2014	42	909.88	50.6	67.08	58.19	0.13

Nota: A: área de drenaje, Y: pendiente media, I: longitud de flujo, L: longitud del cauce principal, S: pendiente media del cauce ppal.

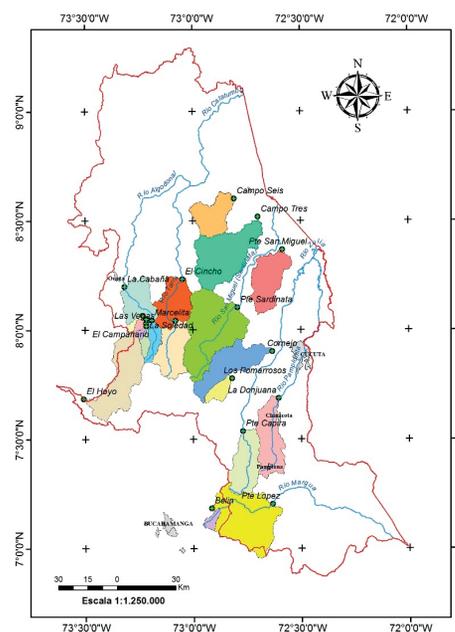


Figura 1. Ubicación y distribución de las cuencas estudiadas.

Análisis de frecuencia

A cada serie histórica de caudales máximos anuales se le aplicó la prueba de datos dudosos (*Outliers*) recomendada por el Water Resources Council (1981) [3]. La cual consiste en identificar por medio de criterios hidrológicos y matemáticos, puntos de la información que se alejan de la tendencia de la

información restante. Debido a que la inclusión o exclusión de estos datos en el registro hidrológico pueden afectar de manera significativa los parámetros estadísticos calculados para la información, los picos de creciente considerados como datos dudosos altos se compararon con la información histórica de crecientes en estaciones cercanas, y teniendo en cuenta que sitios cercanos presentan similares tendencias en su información, se eliminaron del análisis los picos extremos inusuales.

En [3] se propone una ecuación para estimar eventos máximos relacionados a un período de retorno T determinado. La ecuación relaciona los parámetros estadísticos, media y desviación estándar de los datos que se dispongan en el registro histórico, y un factor de frecuencia, K_T , relacionado a un período de retorno específico y a la distribución de probabilidad utilizada. La ecuación es expresada de la siguiente manera: $X_T = \bar{X} + K_T \sigma$; donde X_T es la magnitud del evento máximo a calcular, \bar{X} la media aritmética de la muestra, σ la desviación estándar, y K_T el factor de frecuencia.

Para cada estación seleccionada se determinó el caudal máximo para un período de retorno de cien años (**Q100**), utilizando como distribuciones de probabilidad de valores máximos los factores de frecuencia: Gumbel y Log-Pearson Tipo III.

Estimación del número de curva, CN

Se obtuvo el número de curva de escorrentía (CN) para las tres condiciones antecedentes de humedad en cada cuenca, con base en los mapas de coberturas y usos del suelo, y mediante el uso de las herramientas de geoprocésamiento en ArcGIS® and ArcMap™ software by Esri. Utilizando las tablas de valores del número de curva CN propuestas por [4] en la cual se establece una correspondencia con los usos de suelo indicados en el proyecto CORINE Land-Cover (CLC). Se propone para la definición del grupo hidrológico de suelo una relación con las unidades cartográficas de suelos definidas por el IGAC, en función de la relación de la textura de los suelos del United States Department of Agriculture (USDA) con los grupos hidrológicos que establecen Brakensiek y Rawls (1983), la cual incluso ha llegado a ser admitida por el organismo de referencia del número de curva de escorrentía (*Soil Conservation Service*) como se menciona en [5], y también teniendo en cuenta la profundidad del estrato más impermeable del perfil edáfico representativo de cada unidad de suelos. La Tabla II presenta un extracto de la definición de los grupos hidrológicos en función de las unidades cartográficas de suelos. En la Tabla III se muestran los valores del número de curva para las tres condiciones antecedentes de humedad (AMC, Antecedent Moisture Condition) definidas por el Soil Conservation Service, en cada una de las cuencas.

Tabla II. Grupos hidrológicos en función de las unidades de suelos de Norte de Santander.

No	U.C.S.	COMPONENTE TAXONÓMICO	%	TEXTURA DEL SUELO	PROFUNDIDAD	HSG
1	MEAg	Afloramientos Roccosos - Lithic Cryumbrepts	100	Franco arcillosa	Muy superficiales limitados por roca	D
2	MHDa	Typic Fluvaquents	70	Franca	Muy superficiales a superficiales	B
3	MJAg	Lithic Tropefolists - Afloramientos Roccosos	90	Franco arenosa	Muy superficiales limitados por roca	D
4	MJBe	Typic Dystropepts - Afloramientos Roccosos	100	Arcillosa	Superficiales	D
5	MKBf	Typic Humitropepts	90	Franco arenosa	Profundos	A
6	MKDÉ	Typic Dystropepts - Typic Humitropepts	100	Franco arcillo arenosa	Profundos	C

Tabla III. Valores del número de curva CN del SCS.

Cuencas Hidrográficas		Número de Curva, CN		
No	Estación Hidrológica	AMC I	AMC II	AMC III
1	El Campanario	57	76	88
2	La Cabrera	51	70	84
3	La Soledad	64	81	91
4	Berlín	66	83	93
5	Las Vegas	55	75	87
6	Los Pomarrosos	53	73	86
7	Marcelita	62	79	90
8	Campo Seis	52	71	85
9	Pte Abrego	58	77	88
10	Pte Capira	59	77	89
11	Pte San Miguel	50	69	83
12	La Donjuana	57	76	88
13	Cornejo	57	75	88
14	La Cabaña	62	79	90
15	El Hoyo	55	74	87
16	Campo Tres	50	68	82
17	El Cincho	62	80	90
18	Pte López	66	82	92
19	Pte Sardinata	52	72	85

Hidrograma unitario sintético del SCS

Se obtuvo para cada cuenca el hidrograma unitario para una lluvia efectiva de 1 mm, utilizando el método desarrollado por el Soil Conservation Service (1972) [6]. El servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (SCS, por sus siglas en inglés), actualmente NRCS (National Resources Conservation Service), desarrolló empíricamente un hidrograma unitario adimensional (Figura 2), y corresponde al producto final de este campo importante de la investigación y al trabajo de numerosos investigadores (Mockus 1949, Sherman 1942, Andrews 1954, y Ogrosky 1956). Este modelo hidrológico fue establecido con base en el análisis de una serie de hidrogramas unitarios naturales pertenecientes a cuencas de un extenso rango de tamaños y ubicadas en diferentes partes de la geografía de los Estados Unidos, como se describe en [6].

Para un milímetro de lluvia efectiva, en el sistema métrico, el caudal pico es igual a:

$$Q_p = 0.208 * A / T_p \quad (1)$$

Donde:

Q_p es el caudal pico (m3/s)
 A es el área de drenaje de la cuenca (km2)
 T_p es el tiempo al pico del hidrograma triangular (h)

Para estimar el tiempo al pico el Soil Conservation Service establece la siguiente relación con el tiempo de retardo de la cuenca: $T_p = (10/9) T_r$.

El método del número de curva (CN), expresa el tiempo de retardo de la cuenca a través de la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{[0.8 [2540 - 22.86 \text{ CN}]^{0.7}]}{14104 \text{ CN}^{0.7} \gamma^{0.5}} \quad (2)$$

La ecuación (2) está restringida a números de curva CN en un rango de 50 a 95.

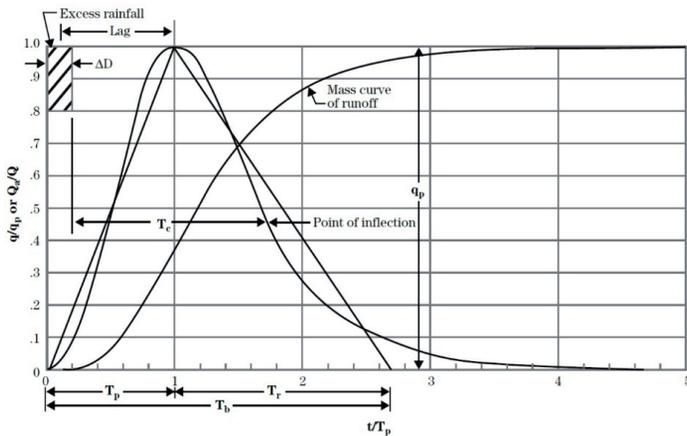


Figura 2. Hidrograma unitario dimensional del SCS. Fuente: [6]

Hietogramas de precipitación

Las intensidades de lluvia para un período de retorno de cien años se determinaron utilizando el método de las curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia, propuesto por [7] (Tabla IV) y adoptado por el INVÍAS en [8], en el cual establecen una correlación con la precipitación máxima promedio anual en 24 horas. De esta manera se determinaron los hietogramas de precipitación mediante el método del bloque alterno. Adicionalmente se efectuó la reducción de la lluvia por espacialidad empleando el factor propuesto por el RAS en [9], como una relación con el área de drenaje, para la cual se definió la Ecuación: $f(a) = -0.039 \ln(A) + 1.1522$, donde A es el área de drenaje en metros cuadrados (m²), ajustando una línea de tendencia Logarítmica con un coeficiente de determinación R² de 0.9851.

$$i = \frac{aT^b M^d}{(t/60)^c} \quad (3)$$

Donde:

i es la intensidad de precipitación (mm/h)
 T es el periodo de retorno (años)
 M es la precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual (mm)
 t es la duración de la lluvia (min)
 a, b, c, d son los parámetros de ajuste de la regresión (-)

Tabla IV. Valores de los coeficientes a, b, c y d

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Las abstracciones de precipitación y su distribución temporal para definir los hietogramas de lluvia efectiva, se calcularon utilizando el método del número de curva (USDS. SCS Curve Number Runoff).

En la Figura 3: I_a es la abstracción inicial, P_e es el exceso de precipitación, F_a es la abstracción continuada, P es la precipitación total, S es la retención potencial máxima y CN es el número de curva de escorrentía.

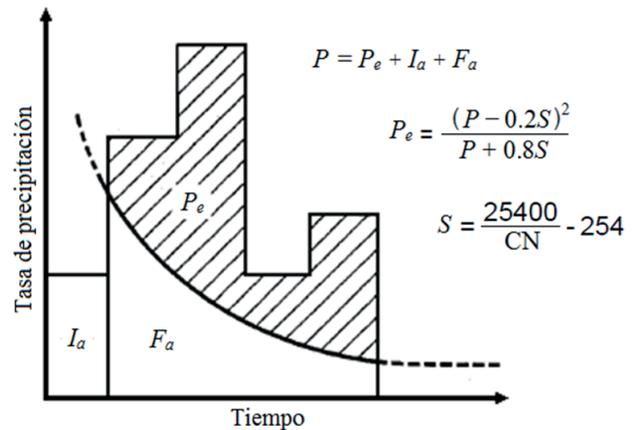


Figura 3. Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS. Fuente: [3]

Mediante el principio de linealidad se realizó la Convolución del hidrograma unitario para obtener los caudales máximos de escorrentía directa, no se tuvo en cuenta el aporte del flujo base para la estimación de los caudales máximos, teniendo en cuenta que para picos extremos de crecientes el porcentaje de flujo base no es significativo en comparación con el caudal total.

Se calcularon los errores relativos del modelo con los resultados del análisis de frecuencia. La bondad del ajuste del modelo se evaluó cuantitativamente utilizando la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la raíz del error cuadrático medio porcentual (RMSEP).

Ajuste de parámetros del modelo

Mediante el procedimiento de calibración por Prueba – error se determinaron los números de curva CN óptimos, es decir, los valores optimizados de este parámetro para los cuales el caudal máximo calculado mediante el hidrograma unitario sintético del SCS predijera de forma exacta el caudal máximo obtenido mediante el factor de frecuencia de la distribución Log-Pearson. Posteriormente se realizó un análisis de regionalización del parámetro número de curva óptimo, con base en el concepto fundamental de homogeneidad hidrológica en una región. Se dividieron las cuencas de estudio considerando rangos de valores del CN y se evaluaron sus características topográficas y climáticas.

Resultados y análisis

En la Tabla V y Figura 4 se presentan los caudales máximos para un período de retorno de 100 años calculados mediante el método del hidrograma unitario sintético del SCS, para las tres condiciones antecedentes de humedad (AMC, Antecedent Moisture Condition) establecidas en el modelo. También se muestran los errores relativos, comparando estos resultados con los caudales máximos utilizando los factores de frecuencia.

Tabla V. Caudales máximos para un período de retorno de 100 años, valores en m³/s.

Cuenca Hidrográfica	Estación Hidrológica	Factores de Frecuencia		Hidrograma unitario sintético SCS			Errores Relativos [%]					
		Gumbel	Log-Pearson	AMC III	AMC II	AMC I	Gumbel			Log-Pearson		
							Q ₁₀₀ [m³/s]	Q ₁₀₀ [m³/s]	AMC III	AMC II	AMC I	AMC III
1	El Campanario	18.15	28.60	254.96	131.26	47.42	1305	623	161	791	359	66
2	La Cabrera	16.53	15.41	158.94	66.91	17.60	862	305	6	932	334	14
3	La Soledad	18.89	25.60	335.92	176.34	75.21	1678	833	298	1212	589	194
4	Berlín	16.98	13.73	144.30	103.58	27.77	750	510	64	951	654	102
5	Las Vegas	205.54	342.97	602.05	325.94	115.56	193	59	-44	76	-5	-66
6	Los Pomarrosos	243.88	491.38	1389.11	812.02	332.20	470	233	36	183	65	-32
7	Marcelita	234.25	284.31	712.70	403.52	163.23	204	72	-30	151	42	-43
8	Campo Seis	1446.32	1600.85	2977.15	1795.21	821.98	106	24	-43	86	12	-49
9	Pte Abrego	283.61	260.92	1956.72	1104.83	405.64	590	290	43	650	323	55
10	Pte Capira	138.23	163.52	1618.92	855.16	302.12	1071	519	119	890	423	85
11	Pte San Miguel	604.44	650.24	2335.94	1419.13	665.33	286	135	10	259	118	2
12	La Donjuana	227.96	247.22	1719.08	919.49	339.63	654	303	49	595	272	37
13	Cornejo	717.77	879.41	3033.10	1705.60	872.44	323	138	22	245	94	-1
14	La Cabaña	445.45	510.95	2305.76	1308.07	630.22	418	194	41	351	156	23
15	El Hoyo	211.49	190.47	3981.17	2375.38	1140.67	1782	1023	439	1990	1147	499
16	Campo Tres	1343.65	1297.24	4278.99	2408.79	1353.71	218	79	1	230	86	4
17	El Cincho	242.82	231.75	3028.91	1743.89	758.53	1147	618	212	1207	652	227
18	Pte López	409.02	473.79	2482.53	1283.85	481.39	507	214	18	424	171	2
19	Pte Sardinata	697.81	714.09	3926.93	2078.63	836.49	463	198	20	450	191	17

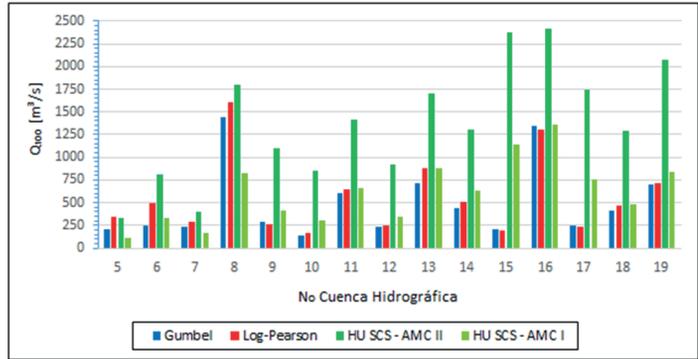
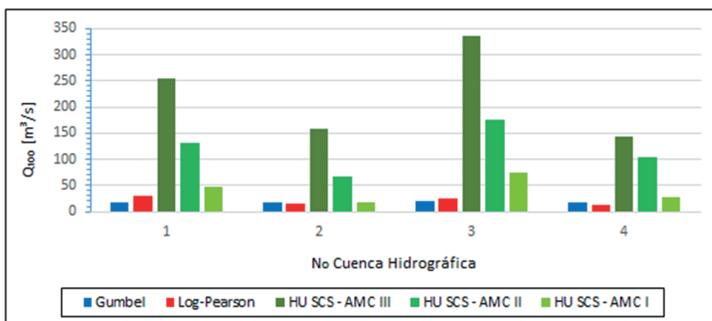


Figura 4. Caudales máximos para un período de retorno de 100 años, valores en m³/s

Cuando se comparan los caudales máximos calculados mediante el hidrograma unitario sintético del SCS con los obtenidos utilizando los factores de frecuencia; considerando que para eventos máximos de crecidas se recomienda el uso de la condición antecedente de humedad con el suelo húmedo (AMC III), se observa que los errores relativos en la mayoría de las cuencas son mucho mayores a 100%, es decir, los caudales máximos calculados para el período de recurrencia son sobreestimados en gran medida. Al calcular los caudales máximos para la condición antecedente de humedad media (AMC II), lógicamente los errores relativos disminuyen, pero las diferencias en los caudales siguen siendo considerablemente altas para la mayoría de las cuencas, excepto en cuatro, en donde los errores relativos son menores a 65%. Por último al estimar los caudales máximos para la condición antecedente de humedad con el suelo seco (AMC I), se observa que para la mayoría de las cuencas; excluyendo las cuatro mencionadas anteriormente, los errores relativos son menores a 66%.

Se observa que los resultados para la condición antecedente de humedad AMC III, valores de CN mayores a 80, reporta diferencias muy altas con respecto a los factores de frecuencia, con errores relativos hasta de 1000% o mayores.

La metodología de los hidrogramas unitarios sintéticos es extensivamente utilizada en Colombia, existen investigaciones en donde se reportan errores similares, como las investigaciones realizadas por [10] en la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, para un conjunto de cuencas, que reportan resultados muy distintos con los diferentes modelos de hidrogramas unitarios sintéticos (entre estos el desarrollado por el SCS) para una misma cuenca, con diferencias de hasta 1000% en las estimaciones. También, se tiene la investigación realizada por [11] en la cual se presentan los resultados obtenidos para caudales máximos con distintos períodos de retorno estimados por diferentes métodos, de los cuales se resaltan los análisis de frecuencia y el hidrograma unitario sintético del SCS, en tres cuencas de Antioquia y el Eje Cafetero, en este sentido se reporta la sobreestimación de los resultados utilizando el hidrograma unitario sintético del SCS con respecto al análisis de frecuencia



(Log Normal y Gumbel), con errores que oscilaron entre 111 y 274%.

En síntesis la mayor aproximación en las estimaciones se obtuvo para la mayoría de las cuencas utilizando el número de curva para la condición antecedente de humedad AMC I, excepto para las cuencas: Las Vegas, Los Pomarrosos, Marcelita y Campo Seis, en donde la mayor aproximación se obtuvo utilizando el número de curva para la condición antecedente de humedad AMC II, para estas cuencas se tiene la mayor desviación estándar con relación a la media de los caudales, es decir alta variabilidad en los caudales máximos anuales, como se puede observar en la Tabla 3. Esta situación puede explicarse por diversas causas, las principales son: precipitaciones anuales mayores a 1600 mm, pendiente media del cauce principal entre 12 y 20%, y rendimientos hídricos de moderados a excesivos que oscilan entre 26 y 82 l/s/km², puntualizando que son cuencas con áreas entre 70 y 315 km².

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente sobre la mayor aproximación de los resultados, se determinó cuantitativamente la bondad de las estimaciones, evaluando la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*) y la raíz del error cuadrático medio porcentual (*RMSEP*), se obtuvo un *RMSE* = 273 y un *RMSEP* = 140%. Excluyendo las dos cuencas con registros menores a 20 años (Pte Capira y El Cincho) y la cuenca con el mayor error relativo (El Hoyo), se obtiene un *RMSE* = 117 y un *RMSEP* = 63%.

También se puede observar de la Tabla V que los mayores errores se presentan en las cuencas: El Hoyo y El Cincho, de esta última se puede señalar que la serie histórica de caudales es de menos de 20 años, y es probable que no sea significativa para representar al caudal máximo para un período de recurrencia alto. La cuenca El Hoyo presenta unas condiciones particulares, es una zona de precipitaciones altas; con una precipitación anual de 2170 mm y con precipitación máxima promedio anual en 24 horas de 112 mm, además es una zona con valores de rendimiento hídrico excesivos, un promedio de 53 l/s/km², pero aún con estas condiciones la serie histórica de caudales máximos que corresponde a 39 años de registro no muestra caudales considerablemente altos, como se puede ver en la Tabla 3 la media y desviación estándar de los caudales no parecen describir las condiciones climáticas extremas de esta zona, como sucede por ejemplo en la cuenca Campo tres que posee condiciones similares. Esta situación podría explicarse principalmente por dos causas, la primera es que puede ser debido a una condición geológica en la zona cercana al punto de descarga o sitio de medición, la segunda razón podría deberse a la acción antrópica, ocasionada por captaciones superficiales, señalando también que es una zona densa de cultivos.

Ajuste de los parámetros

A partir de las condiciones que presentaban los menores errores

en las estimaciones, se realizó el procedimiento de calibración por Prueba – error, determinando los números de curva CN óptimos, para los cuales el caudal máximo calculado mediante el hidrograma unitario sintético del SCS predijera de forma exacta el caudal máximo obtenido mediante el factor de frecuencia Log-Pearson. En la Tabla V se muestran los resultados.

Los resultados de la Tabla VI se pueden interpretar de la siguiente manera: las tres cuencas con menor área de drenaje muestran un número de curva calibrado prácticamente igual, esto es lógico considerando que las cuencas están concentradas en una zona; como se puede observar en la Figura 1, en donde las condiciones climáticas son homogéneas. Sin embargo, los números de curva calculados para la condición AMC I presentan grandes diferencias entre sí, esto puede explicarse teniendo en cuenta que la escala de las unidades de suelos para definir los grupos hidrológicos genera una alta sensibilidad en los valores del CN.

Tabla VI. Caudales máximos para un período de retorno de 100 años. proceso de calibración.

No	Estación Hidrológica	Cuenca Hidrográfica A [Km ²]	Factores de Frecuencia		HU Sintético SCS Q100 [m ³ /s]	Óptimo CN [-]	Log-Pearson Error Relativo
			Gumbel Q100 [m ³ /s]	Log-Pearson Q100 [m ³ /s]			
1	El Campanario	21.4	18.15	28.60	29.08	50	1.68%
2	La Cabrera	24.7	16.53	15.41	15.67	50	1.72%
3	La Soledad	27.0	18.89	25.60	25.82	49	0.84%
4	Berlín	48.6	16.98	13.73	13.90	60	1.28%
5	Las Vegas	69.8	205.54	342.97	343.73	76	0.22%
6	Los Pomarrosos	101.0	243.88	491.38	491.97	60	0.12%
7	Marcelita	105.8	234.25	284.31	286.24	72	0.68%
8	Campo Seis	314.6	1446.32	1600.85	1607.88	69	0.44%
9	Pte Abrego	367.4	283.61	260.92	262.82	51	0.73%
10	Pte Capira	391.6	138.23	163.52	164.88	50	0.83%
11	Pte San Miguel	410.5	604.44	650.24	651.26	50	0.16%
12	La Donjuana	422.7	227.96	247.22	249.52	51	0.93%
13	Cornejo	460.8	717.77	879.41	884.90	57	0.62%
14	La Cabaña	530.8	445.45	510.95	513.31	58	0.46%
15	El Hoyo	604.1	211.49	190.47	232.11	30	21.86%
16	Campo Tres	706.2	1343.65	1297.24	1314.37	50	1.32%
17	El Cincho	722.1	242.82	231.75	236.60	44	2.10%
18	Pte López	834.0	409.02	473.79	474.00	66	0.05%
19	Pte Sardinata	909.9	697.81	714.09	714.85	47	0.11%

En las cuencas con áreas de drenaje aproximadamente entre 50 y 315 km² se observan números de curva de 60 y mayores a 70, se pueden explicar por las razones mencionadas anteriormente referentes a las cuencas en donde se reportó la mayor aproximación utilizando el número de curva para la condición AMC II, excepto la cuenca Berlín, particularmente en esta zona de páramo se presentan las menores lluvias del departamento, evidenciadas con una precipitación máxima promedio anual en 24 horas menor a 40 mm.

Para las cuencas con áreas de drenaje entre 365 y 910 km²; excluyendo la cuenca El Hoyo, la cual presenta condiciones anómalas explicadas anteriormente, y considerando la restricción del SCS para la ecuación del tiempo de retardo con

números de curva no menores a 50, se tienen números de curva óptimos entre 50 y 60, exceptuando la cuenca Pte López que muestra un CN mayor a 60, lo cual se puede explicar porque es una zona con una precipitación máxima promedio anual en 24 horas menor a 40 mm, coincidiendo con las características de la cuenca Berlín, las cuales se encuentran en un área de páramo.

Una de las razones para entender las sobreestimaciones tan altas que genera la aplicación del modelo del SCS, se puede explicar por la generación de los hietogramas de precipitación, debido a la falta de información pluviográfica las intensidades de lluvia se obtuvieron mediante un método sintético, esta situación aumenta la incertidumbre de las estimaciones, haciendo referencia a la investigación realizada por [12] en Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, sobre la regionalización de curvas IDF en el departamento de Boyacá, la cual presenta la comparación con el método de las curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia propuesto por [7], reportando que este método mayormente los resultados de intensidad asociados a un periodo de retorno hasta en un 300%.

Finalmente se realizó con el propósito de regionalizar los números de curva óptimos un análisis de regresión lineal multivariable con características físicas de las cuencas de fácil obtención y que tuvieran relación con los parámetros que definen el CN, sin embargo no se obtuvo una correlación que describiera significativamente el comportamiento de los números de curva CN óptimos, según el coeficiente de determinación el cual arrojó valores de R^2 muy bajos. Situación que puede explicarse por diversas causas, entre estas, la gran diversidad de condiciones topográficas y climatológicas para las cuales se obtienen similares valores de CN óptimos, y además a la alta variabilidad de las condiciones del complejo cubierta-suelo que definen este parámetro. Se evidencia de esta manera que no existe una relación lineal entre el número de curva y las características geomorfoclimáticas.

En [13] se afirma: “Los métodos de regionalización basados en regresiones lineales multivariadas entre los caudales extremos y algunas características hidrográficas de las cuencas, no apuntan al entendimiento e ignoran la complejidad de los fenómenos no lineales y emergentes en las cuencas hidrológicas” (p.68). Este concepto es válido también para los parámetros por calibrar en los modelos hidrológicos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos por el hidrograma unitario sintético del SCS en el cálculo de caudales máximos siempre están por encima de los estimados utilizando análisis de frecuencia para un periodo de retorno de cien años con la distribución Gumbel y Log-Pearson. Con resultados exageradamente mayores usando el número de curva para la condición antecedente de humedad AMC III. Esta situación se sustenta en los resultados que en 1981, el Water Resources Council (WRC), citado por

Linsley (1986), mostró de los análisis de varias metodologías usadas en cuencas no instrumentadas, encontrando que todos los métodos estaban sujetos a grandes errores y presentaban una tendencia a sobreestimar los caudales como se citó en [11]. Los números de curva óptimos en la mayoría de las cuencas, tienden a ser muy cercanos a los valores del CN para la condición antecedente de humedad AMC I, lo cual resulta contraintuitivo, considerando que normalmente las crecidas máximas se presentan en las fuertes temporadas invernales en donde el suelo presenta condición húmeda.

No se encontró una correlación entre los números de curva óptimos y las características geomorfoclimáticas de las cuencas estudiadas, por esta razón no fue posible regionalizar el CN óptimo en Norte de Santander.

Ante la gran incertidumbre que presenta el modelo de hidrograma unitario del SCS para estimar caudales máximos en las condiciones de escasa información para las cuencas en Norte de Santander, se resalta la falta de información hidrológica de caudales instantáneos en el departamento y en general en todo el país.

Para un uso más confiable del hidrograma unitario sintético del SCS, se recomienda estudiar de una forma más detallada las condiciones y parámetros que definen el número de curva y la condición antecedente de humedad, de esta manera tener herramientas que permitan reducir la incertidumbre, teniendo en cuenta que es el único parámetro del modelo y el de más sensibilidad tanto para determinar el caudal y tiempo al pico del hidrograma unitario, como para estimar las abstracciones de la precipitación.

En cuencas no instrumentadas se requiere la disminución de la incertidumbre en la información básica utilizada, especialmente en los datos de lluvia, siendo indispensable y como recomendación la instalación de estaciones pluviográficas en puntos estratégicamente distribuidos y en zonas climatológicamente homogéneas, que permitan la obtención e interpolación de las intensidades de lluvia, de tal manera que aumente la confiabilidad en el diseño y modelamiento hidrológico.

Referencias

[1] “Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000”, IDEAM, Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales, Bogotá, Colombia, 2010. [En línea]. Disponible en http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2d5e-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762

[2] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), *Estudio general de suelos y zonificación de tierras: del departamento Norte de Santander*. Bogotá D.C.: Instituto Geográfico Agustín

Codazzi, 2004.

[3] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, *Hidrología aplicada*. Bogotá D.C.: McGraw-Hill Interamericana S. A., 1994.

[4] J. Ferrer, J. Blanco y J. Ramírez, “Propuesta metodológica para la adaptación del parámetro del número de curva a las nuevas fuentes de datos”, en III Congreso de Ingeniería Civil, Terrorismo y Medio Ambiente, 2006 [En línea]. Disponible en: http://www.ciccp.es/biblio_digital/Icitema_III/congreso/pdf/040205.pdf.

[5] R. Fernández, “Mejora de los parámetros de cálculo del modelo del número de curva y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido”, Tesis doctoral, Universidad de Huelva, 2006 [En línea]. Disponible en: <http://rabida.uhu.es/dspace/handle/10272/2723>

[6] NRCS, “National Engineering Handbook Hydrology Chapters”, 2015 [En línea]. Disponible en: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull//?cid=stelprdb1043063>

[7] R. Vargas y M. Díaz, *Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, 1998.

[8] INVÍAS, “Manual de drenaje para carreteras”, 2009 [En línea]. Disponible en: <http://www.invias.gov.co/>.

[9] *Título D: Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales*, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2016 [En línea]. Disponible en: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO_D.pdf

[10] O. Mesa y B. Botero, “Errores detectados al estimar escorrentía directa, mediante algunos métodos de hidrogramas unitarios sintéticos”, *Avances en Recursos Hidráulicos*, no. 8, pp. 27-38, 2001.

[11] M. Vélez, W. Quintero y J. Delgado, “Implementación del Modelo MG para Antioquia y el Eje Cafetero”, *Avances en Recursos Hidráulicos*, no. 14, pp. 87-96, 2006.

[12] P. Acosta, y C. Caro, “Regionalización de parámetros hidrológicos. Aplicación para intensidad media de precipitación”, V Congreso Internacional de Ingeniería civil, Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, 2014.

[13] G. Poveda y D. M. Álvarez, “El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería”, *Revista de Ingeniería de los Andes*, no. 36, pp. 65-76, 2012.