

# Calibración de rugosidad “n” de Manning para cuencas rurales con cobertura vegetal de bosque

Calibration of Manning “n” roughness for rural watersheds with forest cover

Calibração da rugosidade “n” de Manning para bacias rurais com cobertura florestal

Oscar Fabian Pacheco M

Ingeniero de Vías y Transportes. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. UPTC. Correo electrónico: pachecoo\_m@hotmail.com. Ingeniero Civil de la Fundación Universitaria Agraria de Colombia; con terminación académica y actual candidato a Magister en Ingeniería Civil con Énfasis Hidro-Ambiental en la Universidad Santo Tomás. Tunja – Colombia.

Carlos Andrés Caro Camargo

Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Maestría en Ingeniería Civil-Énfasis Recursos Hídricos de la Universidad De Los Andes - Uniandes. Ph.D en Ingeniería Civil de la Universitat Politècnica de Catalunya. Docente Investigador. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. Correo electrónico: carlosandrescaro@gmail.com. Tunja – Colombia.

## Resumen:

*En las modelaciones hidrológicas el coeficiente de rugosidad es un parámetro de gran importancia ya que determina el grado de resistencia que ofrece el fondo y las paredes de un canal o de una cuenca al flujo del agua; sin embargo, teniendo en cuenta que los valores de referencia existentes para este parámetro tienen un enfoque hidráulico y en pro de obtener resultados más precisos y acertados con la realidad. Este trabajo busca determinar un coeficiente de rugosidad de carácter hidrológico para cuencas con una cobertura vegetal boscosa a partir de la calibración del mismo con un modelo hidrológico distribuido como lo es el Iber (Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas).*

**Palabras clave:** Rugosidad, Manning, hidrología, modelos hidrológicos, calibración.

## Abstract:

*In hydrological modeling the roughness coefficient is a parameter of great importance as it determines the degree of resistance offered by the bottom and walls of a channel or a basin to the flow of water, however, taking into account that the values of reference for this parameter has a hydraulic approach and in order to obtain more precise and accurate results with reality, this work seeks to determine a roughness coefficient of hydrological character for basins with a forest cover vegetation from the calibration of the same with a distributed hydrological model as is the Iber.*

**Keywords:** Roughness, Manning, hydrology, hydrological models, calibration.

Para citar este artículo: Pacheco, O.F. Caro-Camargo, C.A. (2017). "Calibración de rugosidad "n" de Manning para cuencas rurales con cobertura vegetal de bosque". *L'espirt Ingénieur*. Vol. 8, pp. 12 - 121

**Resumo** - Na modelagem hidrológica, o coeficiente de rugosidade é um parâmetro de grande importância, pois determina o grau de resistência oferecido pelo fundo e paredes de um canal ou bacia ao fluxo de água; No entanto, tendo em conta que os valores de referência para este parâmetro têm uma abordagem hidráulica e de forma a obter resultados mais precisos e precisos com a realidade. Este trabalho visa determinar um coeficiente de rugosidade de natureza hidrológica para bacias hidrográficas com uma cobertura vegetal arborizada a partir da calibração das mesmas com um modelo hidrológico distribuído como é Iber (modelagem bidimensional do escoamento de lençol livre em águas rasas).

**Palavras-Chave:** Rugosidade, Manning, Hidrologia, Modelos Hidrológicos, Calibração.

## 1. INTRODUCCIÓN

A través de los años se ha observado el comportamiento de diferentes cuerpos de agua y se analiza especialmente aquellos que presentan eventos extremos como avenidas máximas e inundaciones que tienen un potencial de destrucción. Debido a esto, se crea la necesidad de diseñar e implementar modelaciones hidrológicas ya que son un componente esencial de la gestión integral del recurso hídrico y del medio ambiente. Las modelaciones, ya sean agregadas o distribuidas usan múltiples variables como el caudal, la velocidad, el coeficiente de Manning, el límite mojado-seco, el tipo tamaño del mallado entre otras, de las cuales depende el éxito de la modelación.

La correcta caracterización de estos parámetros y en especial de la rugosidad o coeficiente de Manning permiten realizar cálculos más precisos y obtener datos de salida más confiables, lo que representa un hidrograma de salida más acertado con el sistema físico real. Sin embargo, teniendo en cuenta que la mayoría de modelaciones hidráulicas e hidrológicas toman como referente un Manning de carácter hidráulico, es pertinente llevar a cabo estudios de distribución y simulación de los procesos del ciclo hidrológico natural principalmente en cuencas que carecen de información o de instrumentación.

La calibración del parámetro de rugosidad es fundamental para la aplicación de modelos hidrológicos distribuidos, en los cuales se considera que dicho coeficiente se ve afectado por las bajas alturas de la lámina de agua en zonas de aportación de la cuenca, ya que la presencia de vegetación influye en la resistencia hidráulica del flujo de escorrentía de manera importante (Caro C, 2016). Con base en estas consideraciones, este trabajo tiene como fin determinar valores de referencia para el coeficiente "n" de Manning de tipo hidrológico para la cobertura vegetal de bosque, lo cual se llevará a cabo generando el hidrograma de salida en HEC-HMS de los datos correspondientes a cada una de las cuencas rurales no instrumentadas en estudio para compararlo con el hidrograma generado por el software Iber en las mismas cuencas.

## 2. METODOLOGÍA

En el marco de la problemática descrita, se estableció un procedimiento para la determinación de valores de coeficientes de rugosidad con un carácter hidrológico para una cobertura vegetal de bosques, el cual está fundamentado en la variación del coeficiente de Manning como parámetro de entrada en el software Iber y la comparación entre los hidrogramas de salida del mismo y de las modelaciones realizadas en HEC-HMS para una misma cuenca.

## 2.1 Caracterización de las cuencas Hidrográficas

Para poder obtener los parámetros de entrada tanto para el software Iber como el HEC-HMS se realizó una caracterización previa de las cuencas con una cartografía base obtenida de un Modelo Digital de Elevación (DEM) del Satélite ALOS Sensor Palsar, cuya resolución es de 12.5 metros.

A partir de este DEM y con ayuda de la extensión HEC-GeoHMS de ArcGIS se definió la línea divisoria de ambas cuencas como se muestra en la Figura 1, así como la pendiente del cauce, la longitud máxima de flujo, el área aferente, el tiempo de concentración y el tiempo de retardo de la cuenca, cuyos valores se relacionan en la Tabla 1.

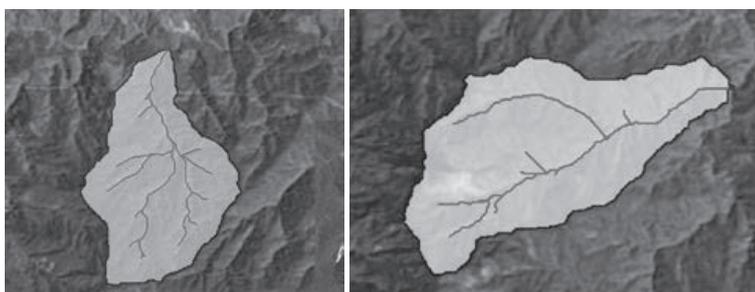


FIGURA 1. LÍNEA PARTE AGUAS.  
Fuente: Elaboración propia.

### Tiempo de concentración

Esta variable se define como el tiempo mínimo requerido para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua simultáneamente al punto de salida (Barea, 2015).

Para la determinación del tiempo de concentración ( $T_c$ ) existen múltiples ecuaciones, sin embargo, el método escogido fue el planteado por Témez (1991) ya que fue el que generó un hidrograma de salida en HEC-HMS de mayor correlación con los hidrogramas resultantes del Iber:

$$T_c = 0.3 * \left[ \frac{L}{S^{0.25}} \right]^{0.76} \quad (1)$$

Así mismo, este parámetro está ampliamente ligado con el tiempo de retardo ( $T_{lag}$ ), cuyo cálculo se realizó aplicando la relación  $T_{lag} = 0.6 * T_c$  (Natural Resources Conservation Service, 2007).

TABLA 1. RESUMEN CARACTERÍSTICAS DE LAS CUENCAS

PARÁMETRO	SÍMBOLO	CUENCA 1	CUENCA 2
		VALOR	
Área cuenca	A (km <sup>2</sup> )	4.19	5.14
Longitud cauce	L (m)	4139.00	4570.59
Pendiente cauce	S (m/m)	0.30	0.37
Tiempo Concentración	$T_c$ (hr)	0.46	0.48
Tiempo de retardo	$T_{lag}$ (min)	16.66	17.26

## 2.2 Modelación en HEC-HMS

Posteriormente, se elaboraron los modelos en el software HEC-HMS y se les asignaron los valores calculados para cada uno de los parámetros anteriormente mencionados. Así mismo, se seleccionaron los métodos de pérdidas y transformaciones, que para el caso de este trabajo corresponden al número de curva de la SCS y el Hidrograma Unitario de la SCS respectivamente.

Basin Name: CUENCA 1 Element Name: Subbasin-1	Basin Name: CUENCA 2 Element Name: Subbasin-1
Description: <input type="text"/>	Description: <input type="text"/>
Downstream: --None--	Downstream: --None--
*Area (KM2) 4.19	*Area (KM2) 5.14
Latitude Degrees: <input type="text"/>	Latitude Degrees: <input type="text"/>
Latitude Minutes: <input type="text"/>	Latitude Minutes: <input type="text"/>
Latitude Seconds: <input type="text"/>	Latitude Seconds: <input type="text"/>
Longitude Degrees: <input type="text"/>	Longitude Degrees: <input type="text"/>
Longitude Minutes: <input type="text"/>	Longitude Minutes: <input type="text"/>
Longitude Seconds: <input type="text"/>	Longitude Seconds: <input type="text"/>
Canopy Method: --None--	Canopy Method: --None--
Surface Method: --None--	Surface Method: --None--
Loss Method: SCS Curve Number	Loss Method: SCS Curve Number
Transform Method: SCS Unit Hydrograph	Transform Method: SCS Unit Hydrograph
Baseflow Method: --None--	Baseflow Method: --None--

FIGURA 2. ASIGNACIÓN MÉTODO DE PÉRDIDAS Y TRANSFORMACIONES.  
Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que las cuencas carecen de instrumentación fue necesario realizar un proceso iterativo con la precipitación, para lo cual se asumieron precipitaciones de 50,75 y 100 mm; caso similar al del número de curva donde se asumieron valores de 55,70 y 77. Es decir, que por cada cuenca se realizaron nueve modelaciones, durante las cuales se varió la precipitación de entrada y el número de curva (NC).

Ya que las cuencas se encuentran en zonas rurales y que la información existente de las mismas es limitada, los datos de NC se escogieron con base en el uso del suelo, las características topográficas propias de la zona y la condición hidrológica de la cuenca, la cual se determinó como buena por ser bosques protegidos del pastoreo y tener un suelo cubierto adecuadamente por humus vegetal; razón por la que le fueron asignados valores altos de NC propios de una cuenca con buen escurrimiento.

## 2.3 Modelación en IBER

Iber es un modelo hidrodinámico que permite realizar simulaciones bidimensionales de los cauces, sin embargo, para llevar a cabo su aplicación es necesario identificar las variables requeridas y las consideraciones a tener en cuenta al asignar los datos de entrada.

### *Coefficiente de rugosidad*

Para poder llevar a cabo la calibración del Coeficiente de rugosidad de Manning “n” mediante la comparación de los hidrogramas resultantes tanto del Iber como del HEC-HMS, se realiza-



ron múltiples modelaciones en las que se varió el “n” aplicando valores de 0.10, 0.12, 0.14, 0.16 y 0.18, y para cuya elección se tomó como referencia el valor proporcionado por defecto en Iber de 0.12 para una cobertura de bosques. En el área correspondiente al drenaje se asignó un coeficiente de rugosidad para río de 0.050.

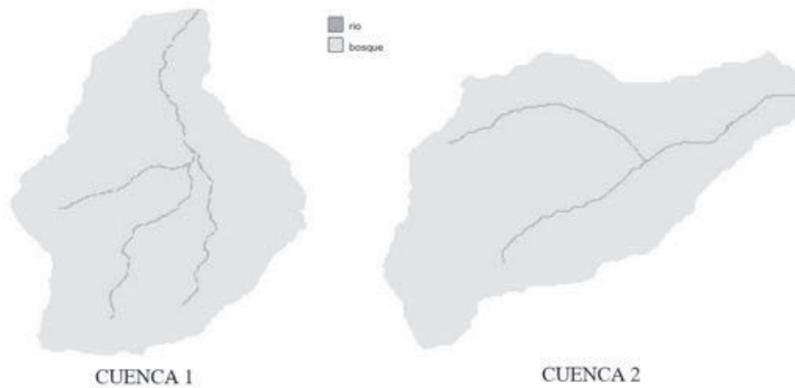


FIGURA 3. ASIGNACIÓN COEFICIENTES DE RUGOSIDAD.  
Fuente: Elaboración propia.

### Mallado

La confiabilidad de los resultados de las modelaciones y el tiempo que le lleve al software realizarlas depende en gran parte del tipo y tamaño de la malla generada, por lo que resulta fundamental escoger acertadamente estas variables (Barea, 2015)

En este trabajo, se utilizó una malla no estructurada que en el área donde se ubica el drenaje se construyó cada 2 m, mientras que en el área aportante restante de cada cuenca se construyó cada 10 metros. Las mallas generadas para las modelaciones se muestran a continuación.

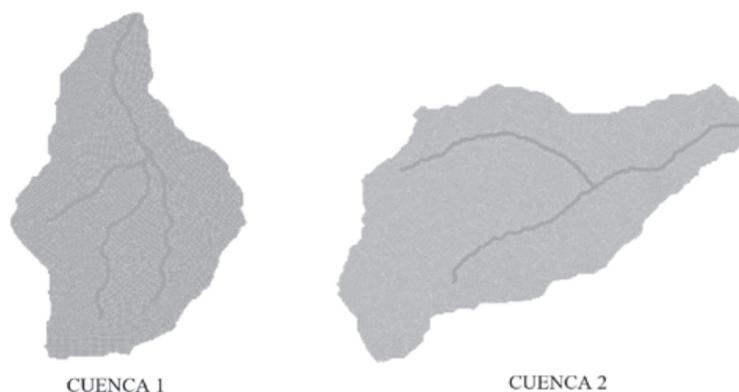


FIGURA 4. TAMAÑO DE MALLADO.  
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, a partir de un archivo con formato ASCII obtenido del DEM, se asignaron las elevaciones al mallado de cada una de las cuencas.

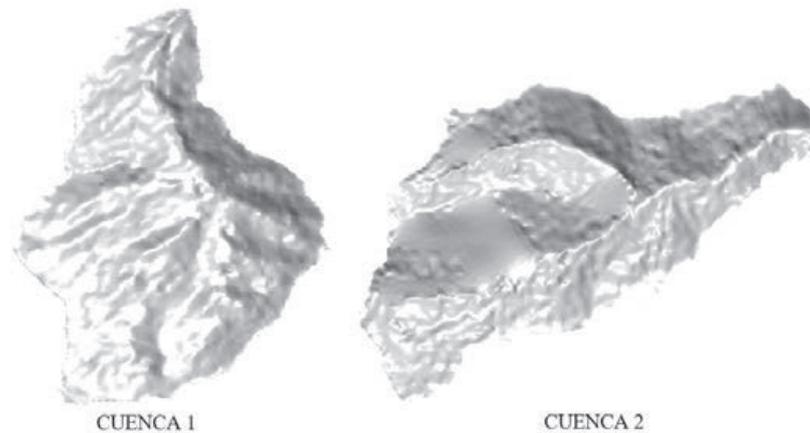


FIGURA 5. ASIGNACIÓN DE ELEVACIÓN A LAS SUPERFICIES.  
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en los procesos llevados a cabo en el HEC-HMS, en estas modelaciones se realizó un proceso iterativo con las precipitaciones, asignado valores de intensidad de precipitación de 50,75 y 100 mm/h con una duración de una hora, y se varió tanto el número de curva como el coeficiente rugosidad según los descrito en los anteriores capítulos; siendo este último un parámetro que depende directamente de la intensidad de la lluvia.

#### *Otros parámetros de entrada*

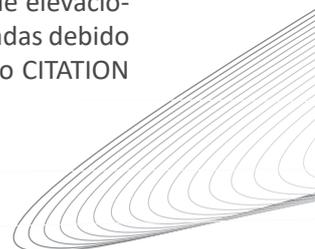
Basados en las características de la cuenca y el tipo de problema a resolver se establecieron los siguientes parámetros de entrada:

*Esquema numérico desacoplado.* Este nuevo esquema tiene la finalidad de resolver las inestabilidades que se presentan cuando las modelaciones se llevan a cabo implementando un esquema numérico de primer o de segundo orden, en especial cuando los cálculos hidrológicos se realizan con caudales pequeños. Es por esto que se optó por utilizar durante las modelaciones el esquema desacoplado implementado en las versiones actuales de Iber denominado DHD [Hidrológico].

*Umbral Seco-mojado.* Esta variable indica el valor límite del calado por encima del cual Iber considera un elemento como mojado CITATION MarcadorDePosición4 \ | 3082 (Barea, 2015) . Este valor para efectos de la modelación se consideró como 0.001 m.

Adicionalmente, frente a este parámetro Iber incorpora tres métodos de secado, el secado normal o por defecto, el seco estricto y el secado hidrológico, de los cuales se seleccionó el último, ya que evita los calados negativos sin necesidad de disminuir considerablemente los  $\Delta t$ , lo que aumentaría los tiempos de cálculo; y si llegado el caso los calados son bajos, el método evita fuertemente las inestabilidades CITATION MarcadorDePosición4 \ | 3082 (Barea, 2015) .

*Fills sinks.* Esta herramienta originalmente se implementó a partir de la versión 2.0 del Iber con la finalidad de rellenar aquellas depresiones existentes en el modelo digital de elevaciones CITATION MarcadorDePosición4 \ | 3082 (Barea, 2015) , que suelen ser ocasionadas debido a la resolución de los datos o el redondeo de las elevaciones al valor más cercano CITATION ESR17 \ | 3082 (ESRI Developer Network , 2017) .



A través de su aplicación se logra modificar la elevación de un pixel de tal forma que exista una pendiente continua hacia la salida de la cuenca, permitiendo el flujo del agua.

### 3. RESULTADOS

Una vez realizadas las modelaciones, se hizo una representación inicial de los resultados mediante un hidrograma unitario, en el cual se consignaron los valores de los caudales de salida obtenidos tanto del HEC-HMS como del Iber, discriminando según la precipitación y el número de curva asignados, y contrastando los datos resultantes de las modelaciones con los diferentes coeficientes de rugosidad asumidos (0.10, 0.12, 0.14, 0.16 y 0.17). Dichas representaciones se muestran a continuación:

#### Cuenca 1

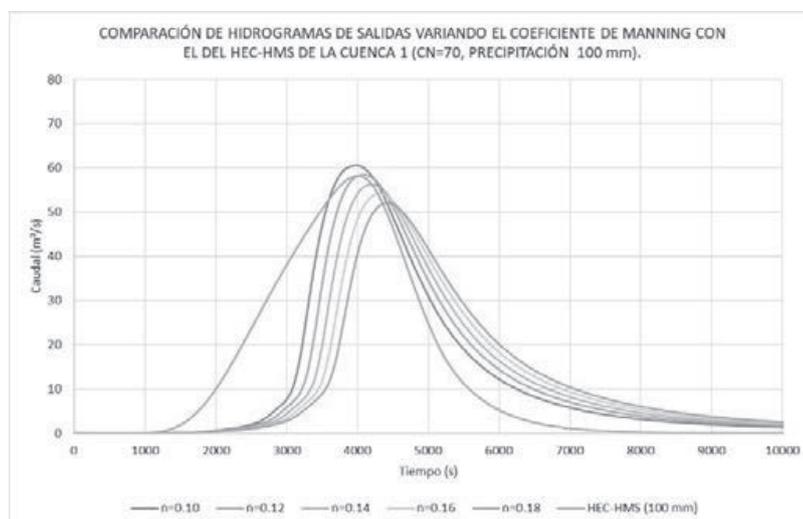


FIGURA 6. COMPARATIVO ENTRE HIDROGRAMAS DE SALIDA CUENCA 1 (I=100 MM/H, NC=70, N=VARIABLE). Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2. COMPARACIÓN ANALÍTICA DE LOS HIDROGRAMAS RESULTANTES DE LA CUENCA 1

PARÁMETRO	HEC-HMS	MODELOS IBER				
		n=0.10	n=0.12	n=0.14	n=0.16	n=0.18
Caudal Pico Qp (m <sup>3</sup> /s)	58.19	60.63	58.42	56.34	54.21	52.10
Tiempo Pico Tp (hr)	1.11	1.11	1.14	1.17	1.19	1.22
Precipitación Efectiva Pe (mm)	32.7	31.9	31.9	31.9	31.9	31.8
Volumen residual (mm)	-	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9
Porcentaje error al pico Qp	-	4.2%	0.4%	3.2%	6.9%	10.5%
Porcentaje error al pico Tp	-	0.0%	2.5%	5.0%	7.5%	10.0%
Desviación media acumulada (MAD)	-	1.795	2.248	2.699	3.108	3.477
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	-	4.917	5.907	6.844	7.701	8.476
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)	-	0.825	0.747	0.661	0.570	0.479

De Figura 6 y la Tabla 2 se puede apreciar que la modelación de Iber con un Manning de 0.12 es la que más se acerca al caudal pico y al tiempo pico del hidrograma comparado del HEC-HMS.

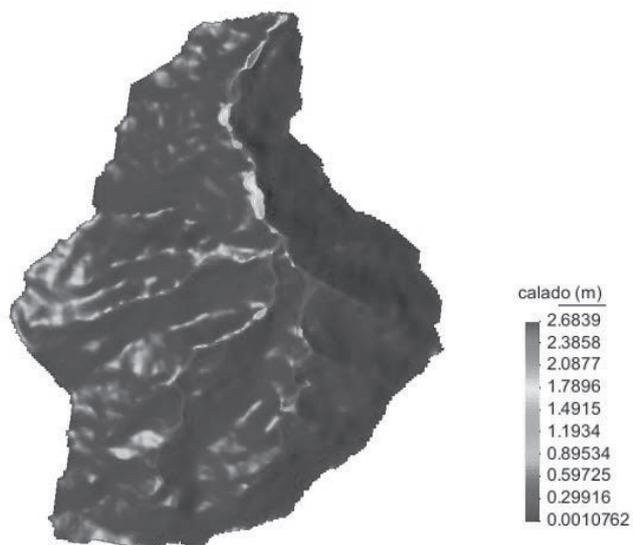


FIGURA 7. MAPA DE CALADOS MÁXIMOS CUENCA 1 (I=100 MM/H, NC=70, N=0.12).  
Fuente: Elaboración propia

*Cuenca 2*

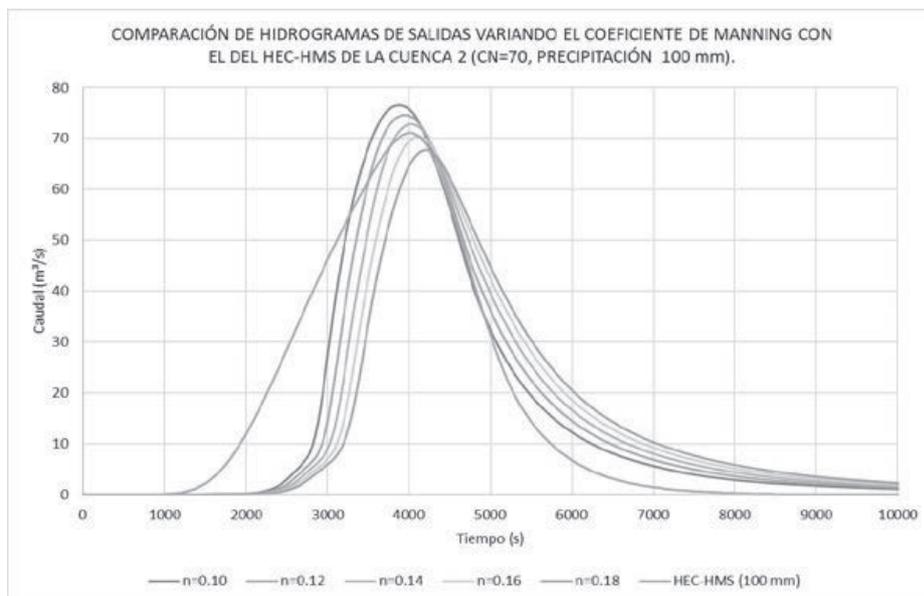


FIGURA 8. COMPARATIVO ENTRE HIDROGRAMAS DE SALIDA CUENCA 2 (I=100 MM/H, NC=70, N=VARIABLE).  
Fuente: Elaboración propia.

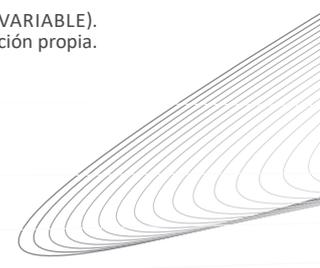


TABLA 3. COMPARACIÓN ANALÍTICA DE LOS  
HIDROGRAMAS RESULTANTES DE LA CUENCA 2

PARÁMETRO	HEC-HMS	MODELOS IBER				
		n=0.10	n=0.12	n=0.14	n=0.16	n=0.18
Caudal Pico Qp (m <sup>3</sup> /s)	71.03	76.53	74.56	72.74	70.36	67.78
Tiempo Pico Tp (hr)	1.11	1.08	1.11	1.11	1.14	1.17
Precipitación Efectiva Pe (mm)	32.7	31.9	31.9	31.9	31.9	31.9
Volumen residual (mm)	-	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9
Porcentaje error al pico Qp	-	7.7%	5.0%	2.4%	1.0%	4.6%
Porcentaje error al pico Tp	-	2.5%	0.0%	0.0%	2.5%	5.0%
Desviación media acumulada (MAD)	-	1.519	1.879	2.281	2.708	3.124
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	-	4.463	5.296	6.176	7.044	7.871
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)	-	0.903	0.864	0.815	0.759	0.700

De Figura 8 y la Tabla 3 se puede apreciar que las modelaciones de Iber con un Manning de 0.14 y 0.16 son las que más se acercan al caudal pico y al tiempo pico del hidrograma comparado del HEC-HMS, siendo el Manning de 0.14 el que más se ajusta el que más se ajusta a estos parámetros.

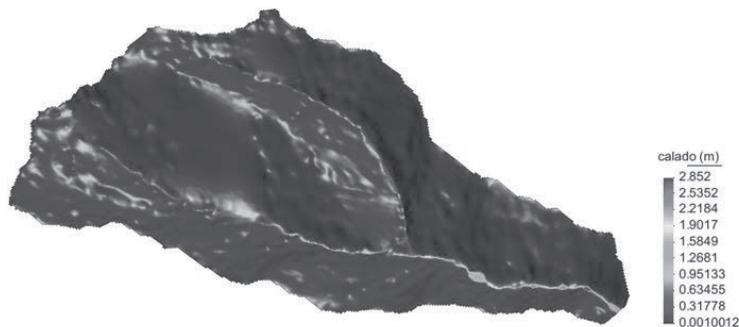


FIGURA 9. MAPA DE CALADOS MÁXIMOS CUENCA 2 (I=100 MM/H, NC=70, N=0.14). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

De lo anterior es posible afirmar que en comparación con los modelos del HEC-HMS, en los modelos de Iber se presenta una mayor atenuación de la rama ascendente del hidrograma de respuesta ocasionada por las pérdidas o abstracciones generadas por el número de curva asignado.

Así mismo, se evidenció una correlación entre el tiempo al pico y el caudal pico de los modelos, aunque la variación en el tiempo de los volúmenes en la respuesta hidrológica presenta diferencias entre los modelos del Iber y del HEC-HMS.

#### 4. CONCLUSIONES

Las modelaciones obtenidas de Iber se compararon con el modelo HEC-HMS, empleándose el hidrograma típico PRF 484 del “Soil Conservation Service” SCS, estimándose las pérdidas mediante el Número de curva CN, el cual asocia de manera indirecta el efecto de la vegetación en la respuesta hidrológica de la cuenca. En el caso del modelo Iber, además del número de curva, la vegetación se asocia con el coeficiente de rugosidad de Manning, siendo éste la

variable de calibración del modelo en este estudio.

Las calibraciones se llevaron a cabo mediante el uso de un modelo hidrológico distribuido, comparado con un modelo hidrológico global en donde se empleó un hidrograma típico, el cual es de gran uso y cuenta con gran aceptación a nivel mundial, dando una aproximación teórica en la delimitación de la búsqueda de los coeficientes de Manning para modelaciones hidrológicas distribuidas y sirviendo de referencia metodológica para abordar este tipo de estudios.

En la modelación hidrológica de Iber es fundamental la utilización del esquema numérico de cálculo desacoplado, o como aparece en el software "DHD Hidrológico", ya que los otros esquemas, de Primer Orden y de Segundo Orden, presentan inestabilidad en el cálculo hidrológico, obteniéndose hidrogramas de salida con muchas fluctuaciones.

## REFERENCIAS

BIBLIOGRAPHY \ | 9226 Barea, C. D. (2015). *Modelización hidrológica distribuida con un esquema en volúmenes finitos. Validación del método.*

Caro C, C. (2016). *Modelación hidrológica distribuida en base a esquemas de volúmenes finitos, Tesis Doctoral.* Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

ESRI Developer Network . (27 de 09 de 2017). *EDN: Red de Desarrolladores ESRI.* Obtenido de [http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.2/NET/shared/geoprocessing/spatial\\_analyst\\_tools/how\\_fill\\_works.htm](http://edndoc.esri.com/arcobjects/9.2/NET/shared/geoprocessing/spatial_analyst_tools/how_fill_works.htm)

Investigación y Educación en Enfermería. (2007). El resumen de un artículo científico: Qué es y qué no es. *25 (1)*, 14-17. Recuperado el 10 de Marzo de 2016, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-53072007000100001&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-53072007000100001&lng=en&tlng=es) .

INVIAS . (2009). *Manual de drenaje para carreteras.*

Natural Resources Conservation Service . (2007). En *National Engineering Handbook. Chapter 16: Hydrographs.*

Témez, J. R. (1991). Extended and improved Rational Method. *XXIV Congreso internacional de la IAHR*, (págs. 33-40). Madrid.

