

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

AJUSTE DEL NÚMERO DE CURVA MEDIANTE OPTIMIZACIÓN EN HEC-HMS EN
LA MICROCUENCA LA VEGA, EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA.

GERARDO ENRIQUE ELIZONDO CORDERO

CARTAGO, 2018

AJUSTE DEL NÚMERO DE CURVA MEDIANTE OPTIMIZACIÓN EN HEC-HMS EN
LA MICROCUENCA LA VEGA, EL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA.

Gerardo Enrique Elizondo Cordero

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Lic. Fernando Watson Hernández

Asesor

MSc. Marvin Villalobos Araya

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2018

Este proyecto fue supervisado por el profesor Dr. Enrique Alejandro Torres Prieto de la Universidad Nacional de Colombia y en colaboración con el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia (CENICAÑA).

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|-------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE CONTENIDO | iv |
| ÍNDICE DE CUADROS | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| 1. RESUMEN | x |
| 1.1. ABSTRACT | xii |
| 2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 13 |
| 2.1. Objetivos | 15 |
| 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 3.1. HEC-HMS..... | 17 |
| 3.2. Número de curva (SCS-CN) | 17 |
| 3.3. Hidrograma unitario Clark | 18 |
| 3.4. Hidrograma unitario Snyder..... | 18 |
| 3.5. Hidrograma Unitario SCS | 18 |
| 3.6. Flujo base | 19 |
| 3.7. Algoritmo de ajuste Nelder-Mead..... | 20 |
| 3.8. Función objetivo Nash Sutcliffe..... | 22 |
| 3.9. Función objetivo Error Medio Cuadrático (RMSE)..... | 23 |
| 3.10. Área de estudio..... | 23 |
| 4. METODOLOGÍA | 25 |
| 4.1. Datos empleados | 26 |
| 4.2. Proceso de optimización o calibración en HEC-HMS | 29 |
| 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 31 |
| 6. CONCLUSIONES | 40 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA | 42 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 4.1. Fecha de registro de los eventos a evaluar..... | 26 |
| Cuadro 4.2. Parámetros requeridos de los distintos métodos..... | 27 |
| Cuadro 4.3. Aproximación inicial de algunos parámetros..... | 28 |
| Cuadro 5.1. Información de modelaciones con número de curva de tablas..... | 32 |
| Cuadro 5.2. Error caudal pico en los eventos..... | 33 |
| Cuadro 5.3. Error promedio de los 5 eventos para los distintos PRF..... | 34 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.1. Proceso de reflexión del algoritmo Nelder-Mead. | 20 |
| Figura 3.2. Proceso de expansión del algoritmo Nelder-Mead..... | 21 |
| Figura 3.3. Proceso de contracción del algoritmo Nelder-Mead. | 21 |
| Figura 3.4. Proceso de reducción del algoritmo Nelder-Mead. | 22 |
| Figura 3.5. Ubicación área de estudio..... | 24 |
| Figura 4.1. Procedimiento de cálculo HEC-HMS | 29 |
| Figura 4.2. Comparación del hidrograma computado contra el observado. | 30 |
| Figura 5.1. Hidrograma computado sin optimizar parámetros de flujo base contra hidrograma observado | 35 |
| Figura 5.2. Hidrograma computado optimizando parámetros de flujo base contra hidrograma observado | 35 |
| Figura 5.3. Valor de Nash Sutcliffe para cada evento. | 36 |
| Figura 5.4. Número de curva optimizado contra precipitación acumulada. | 37 |
| Figura 5.5. Número de curva de tablas contra número de curva optimizado | 38 |
| Figura 5.6. Valor de la función objetivo RMSE para método de transformación de eventos seleccionados | 38 |

1. RESUMEN

En este proyecto se realizó un análisis del método de número de curva (desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos) y una comparación de tres distintos métodos de transformación de precipitación neta a escorrentía (hidrograma unitario de Clark, hidrograma unitario de Snyder y el hidrograma unitario del SCS) en la microcuenca La Vega, ubicada en El Valle del Cauca, Colombia.; utilizando el modelo computacional HEC-HMS.

La importancia del proyecto radica en la evaluación del rendimiento del método de número de curva calculado tradicionalmente (tablas) para la estimación de la escorrentía, así como la determinación del método de transformación más adecuado para realizar las modelaciones en el área de estudio.

Se evaluaron los distintos métodos, utilizando los criterios de Nash Sutcliffe y el error medio cuadrático. Los resultados demostraron que el método de número de curva calculado por tablas no predijo con éxito la escorrentía observada y que el método de transformación más apto para esta microcuenca es el hidrograma de unitario del SCS. Además, se concluyó que los resultados obtenidos para estimar la escorrentía fueron mejores al calibrar el número de curva y los parámetros de los métodos de transformación y flujo base, a partir de los flujos observados.

Palabras clave: HEC-HMS, hidrograma unitario de Clark, hidrograma unitario de Snyder, hidrograma unitario del SCS, número de curva.

1.1. ABSTRACT

This project consists on the analysis of the curve number method (developed by the United States Soil Conservation Service) and a comparison of the methods of the different communication modes (Clark unit hydrograph, Snyder unit hydrograph and SCS unit hydrograph) in the La Vega micro-watershed, located in El Valle del Cauca, Colombia. Using the HEC-HMS computer model.

The importance of the project lies in the evaluation of the performance of the curve number method traditionally calculated (tables) for the performance of runoff, as well as the most appropriate response method to perform the modalities in the study area.

The different methods were evaluated, using the Nash Sutcliffe criteria and the mean square error. The results will show that the curve number method that is used in the tables, without a successful prediction in the observation and that the most suitable response method for this micro-basin is the unit hydrograph of the SCS. It was also concluded that the results to estimate the runoff were better to calibrate the number of the curve and the parameters of the production methods and base flow, from the observed results.

Key words: HEC-HMS, curve number, Snyder unit hydrograph, Clark unit hydrograph, SCS unit hydrograph.

2. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La escorrentía es uno de los valores más relevantes a conocer en cualquier modelación hidrológica de una cuenca, el método SCS-CN (número de curva) es de las metodologías empíricas más utilizadas para este cálculo. No obstante, según diversos estudios que se han realizado en cuencas tropicales, una de las principales limitantes de este método es que no ha sido factible estimar el exceso de precipitaciones de forma adecuada. Lo mencionado anteriormente provoca variaciones considerables entre las escorrentías pronosticadas de las observadas. La conclusión que han presentado los diversos estudios es que el uso de tablas SCS estándar en climas tropicales puede conducir a errores significativos en la estimación de la escorrentía, por lo que recomiendan un ajuste del método o inclusive un reemplazo de este, por uno que derive los valores de CN de la escorrentía de lluvia local (Halwatura & Najim, 2013).

Este estudio se desarrolló en la microcuenca La Vega, perteneciente a la cuenca del río Bolo, ubicada entre los municipios de Pradera, Candelaria y Palmira, en el departamento El Valle del Cauca, Colombia. En este proyecto se realizó investigación acerca del modelo SCS-CN para determinar si es necesario realizar mejoras o incluso un reemplazo de este, tal y como lo han planteado las anteriores investigaciones (Ajmal, Moon, Ahn, & Kim, 2015). Además, se realizó una comparación entre métodos de transformación del hidrograma unitario de Snyder, el hidrograma unitario de Clark y el hidrograma unitario del SCS, para determinar cuál simula de una mejor manera los flujos observados para el área de estudio seleccionada.

Para llevar a cabo este proyecto se utilizó el programa para modelación hidrológica HEC-HMS, el cual está diseñado para ser aplicable en un amplio rango de áreas geográficas para resolver el rango más amplio posible de problemas, entre ellos la optimización de parámetros de los distintos procesos relacionados la simulación de flujos. Con esta herramienta se buscó optimizar los parámetros de los distintos modelos para los procesos de cálculo de pérdidas, transformación y flujo base, ajustando los hidrogramas simulados a los observados. Si bien la estimación de parámetros mediante la optimización no produce resultados perfectos, resulta como una ayuda valiosa al calibrar modelos.

2.1. Objetivos

Objetivo general

- Analizar la metodología del número de curva y métodos de transformación mediante procesos de optimización en HEC-HMS en la microcuenca La Vega, El Valle del Cauca, Colombia.

Objetivos específicos

- Comparar los valores de número de curva calculado a partir de tablas y los calculados a partir de los procesos de optimización en HEC-HMS.
- Evaluar los ajustes entre los hidrogramas computados por el programa HEC-HMS y los hidrogramas observados.
- Comparar el rendimiento de los métodos de transformación del hidrograma unitario de Clark, hidrograma unitario de Snyder y el hidrograma unitario del SCS, en la simulación de los flujos observados.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos para modelación hidrológica en cuencas (Feldman, 2000). El sistema comprende los siguientes procesos fundamentalmente: pérdidas, transformación de escorrentía, enrutamiento de canal abierto y análisis de datos meteorológicos, simulación de precipitación-escorrentía y evaluación de parámetros (Oleyiblo & Li, 2010; Sepehri, Malekinezhad, Ilderomi, Talebi, & Hosseini, 2018). Dentro de los métodos incluidos en el programa para el cálculo de pérdidas se encuentra el número de curva del Servicio de Conservación de Suelos, elegido para realizar este estudio.

3.2. Número de curva (SCS-CN)

El número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) es un modelo popular de precipitación-escorrentía ampliamente utilizado para estimar las pérdidas y el escurrimiento directo de un evento de lluvia dado (Ajmal, Waseem, Wi, & Kim, 2015; Deshmukh, Chaube, Ekube Hailu, Aberra Gudeta, & Tegene Kassa, 2013; Petroselli, Grimaldi, & Romano, 2013; Shadeed & Almasri, 2010). Este modelo fue desarrollado como producto de 20 años de estudios relacionando precipitación-escorrentía de pequeñas cuencas rurales en Estados Unidos.

En la práctica, es común tener pocos datos para la estimación de la escorrentía, por lo tanto, debido a la sencillez, el método del CN es ampliamente usado (Caviedes-Voullième, García-Navarro, & Murillo, 2012). Sin embargo, Ajmal, Moon, Ahn y Kim (2015) han encontrado errores en la estimación de la escorrentía del método del CN, por lo tanto, para reducir dichos errores, recomiendan calibrar los CN utilizando datos observados de precipitación-escorrentía de las cuencas hidrográficas regionales. El programa HEC-HMS mediante este método calcula la precipitación neta, para posteriormente calcular el escurrimiento directo mediante el proceso de transformación. Dentro del programa se incluyen distintos métodos de transformación, donde se seleccionaron para este estudio el hidrograma unitario de Clark, hidrograma unitario de Snyder y el hidrograma unitario del SCS.

3.3. Hidrograma unitario Clark

El hidrograma unitario de Clark es una metodología de hidrograma unitario sintético. Esta metodología utiliza parámetros de tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento. El coeficiente de almacenamiento representa el retardo que la cuenca le impone a la escorrentía superficial para desplazarse, simulando el comportamiento de la cuenca como si fuese un depósito lineal, en el cual un aumento en el caudal de entrada se refleja en un caudal de salida retardado (Ellouze-Gargouri & Bargaoui, 2012; Nourani, Roushangar, & Andalib, 2018). Dichos parámetros presentan buenos resultados al ser determinados mediante procesos de calibración (Straub, Melching, & Kocher, 2000). Según un estudio desarrollado por Ahmad, Ghumman y Ahmad (2009), al realizar el cálculo de del tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento mediante procesos de calibración se obtuvieron eficiencias del modelo mayores del 95% y un error medio cuadrático menor de 6%.

3.4. Hidrograma unitario Snyder

El hidrograma unitario de Snyder es otro método de hidrograma unitario sintético. Este método solo utiliza dos parámetros que son el tiempo de retraso estándar, que se define como el tiempo entre el centroide de la masa de precipitación y el caudal máximo resultante (US Army Corps of Engineers, 2015); así como el coeficiente pico que mide la inclinación del hidrograma de precipitación, cuyos valores oscilan generalmente entre 0,4 a 0,8, donde los valores más bajos están asociados con hidrogramas de ascenso pronunciado (Feldman, 2000).

3.5. Hidrograma Unitario SCS

El hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos define un hidrograma unitario curvilíneo (U.S.D.A, 2007). Este método requiere de entrada el factor de frecuencia máxima (PRF) y el tiempo de retraso. El tiempo de retraso se define como la diferencia de tiempo desde el centroide de la lluvia neta hasta la descarga máxima en la salida de la cuenca (US Army Corps of Engineers, 2015). El factor de frecuencia máxima (PRF) es una relación del porcentaje de escurrimiento que ocurre antes del flujo máximo y no es uniforme en todas las cuencas hidrográficas porque depende de la longitud del flujo, la pendiente del terreno y otras propiedades de la cuenca (Feldman, 2000). Este factor es mayor en las cuencas

hidrográficas montañosas, por ejemplo, 600, mientras que, en las áreas planas y arenosas, será menor, alrededor de 300.

Se han realizado investigaciones comparando los distintos métodos de transformación. Güçlü & Şen (2016) llevaron a cabo modelaciones hidrológicas de ocho eventos con dos métodos de hidrogramas unitarios (Snyder y Clark), y demostraron, mediante el criterio de evaluación del error medio cuadrático, que el método del hidrograma unitario de Snyder simula los flujos de una mejor manera que el método del hidrograma unitario de Clark. De igual manera en un estudio realizado por Halwatura y Najim (2013) en la cuenca de Attanagalu Oya, Sri Lanka; se demostró que como método de transformación, el hidrograma unitario de Snyder simula los flujos de manera más confiable en la cuenca del estudio que el método del hidrograma unitario de Clark. Sumado a estas investigaciones, Wałęga, Grzebinoga y Paluszkiewicz (2011) demostraron que en la cuenca del río Grabinka, Brzozówka, Polonia; donde se compararon los hidrogramas unitarios de Snyder y Clark, que el hidrograma unitario de Snyder presentó un coeficiente de eficiencia mayor que el hidrograma unitario de Clark, simulando mejor los flujos máximos el hidrograma unitario de Snyder. Por otro lado, Rathod, Borse, y Manekar (2015) realizaron un estudio en tres subcuencas del río Tapi, India; demostrando que el hidrograma unitario del SCS simula mejor los caudales pico que el hidrograma unitario de Snyder. De la misma manera, Dastorani, Khodaparast, Talebi, Vafakhah, y Dashti (2011) concluyeron en un estudio realizado en Toroq, India, que el hidrograma unitario del SCS presenta una mayor solidez para la estimación de escorrentía que el hidrograma unitario de Snyder.

3.6. Flujo base

Una vez calculada la escorrentía directa mediante el proceso de transformación, el programa le suma la escorrentía básica calculada a partir de los métodos de flujo base incluidos, siendo el método de la curva de recesión el utilizado en este estudio. La curva de abatimiento o curva maestra de recesión de flujo base es una de las técnicas más antiguas para la separación de flujo base de la escorrentía directa, descrita por Horton (1933). La curva maestra de recesión ha sido considerada como una herramienta expedita y de uso generalizado en la hidrología, que expresa una función exponencial decreciente (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016). Para el

desarrollo de este método en el programa HEC-HMS es necesario ingresar el caudal base inicial, la constante de recesión y la relación al pico de caudal donde termina la escorrentía directa (US Army Corps of Engineers, 2015).

3.7. Algoritmo de ajuste

El algoritmo Nelder-Mead "simplex" es uno de los métodos más ampliamente utilizados para la optimización, basado en métodos numéricos para minimizar una función objetivo sin restricciones (Lagarias, Reeds, Wright, & Wright, 1998). El algoritmo genera para n parámetros, $n + 1$ vértices (Senthil Kumar, Charles Raja, Jeslin Drusila Nesamalar, & Venkatesh, 2018). Cada vértice se reemplaza por un nuevo vértice mediante el uso de una de las cinco operaciones: comparación, reflexión, expansión, contracción y reducción, descritos a continuación (Jeslin Drusila Nesamalar, Venkatesh, & Charles Raja, 2016).

Comparación: El primer paso que realiza el algoritmo es encontrar el vértice con el peor valor de la función objetivo y el que produce el valor mejor, denominados con las letras P y M respectivamente.

Reflexión: En el paso siguiente busca el centroide (C) de todos los vértices con excepción el vértice P. Como se muestra en la figura 3.1, se define una línea desde P pasando por C, y se refleja una distancia P-C a lo largo de la línea para definir un nuevo vértice R.

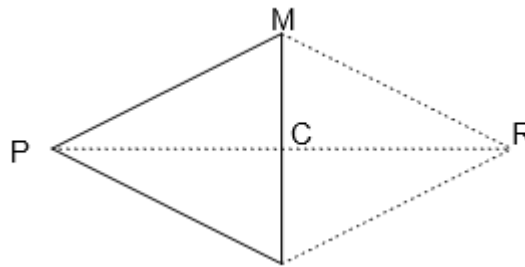


Figura 3.1. Proceso de reflexión del algoritmo Nelder-Mead.

Expansión: Si el conjunto de datos representados por el vértice R es mayor o igual al vértice M, el algoritmo expande aún más la línea C-R en la misma dirección, definiendo un nuevo vértice (E) como se muestra en la figura 3.2. Si E es mayor que M, el vértice P se

reemplaza por el vértice E, pero si el vértice E no es mejor que el vértice M, se reemplaza el vértice P por el vértice R.

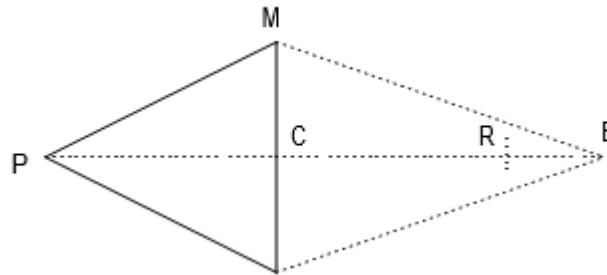


Figura 3.2. Proceso de expansión del algoritmo Nelder-Mead.

Contracción: Si el vértice R no es mejor que cualquier otro vértice, excluyendo el peor (P), el algoritmo se contrae como se muestra en la figura 3.3. Para realizar esto, el vértice P se desplaza a lo largo de la línea hacia al centroide (P-C). Si el valor de la función objetivo en el vértice contraído (Co), el vértice P se reemplaza por este vértice.

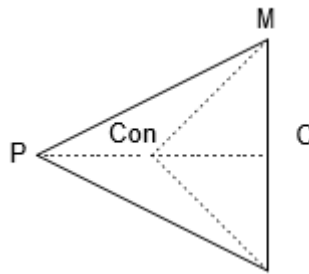


Figura 3.3. Proceso de contracción del algoritmo Nelder-Mead.

Reducción: Como se muestra en la figura 3.4, si el vértice contraído no es una mejora, el algoritmo se reduce en todos los vértices hacia al mejor vértice, generando dos nuevos vértices R1 y R2.

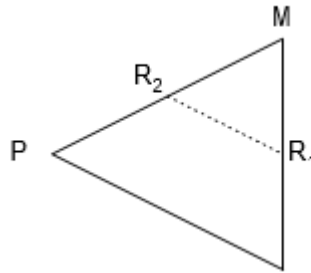


Figura 3.4. Proceso de reducción del algoritmo Nelder-Mead.

El algoritmo de ajuste Nelder-Mead se repite y termina cuando se cumple alguno de los siguientes criterios:

a) Cuando la ecuación $\sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{(z_j - z_c)^2}{n-1}} < \text{tolerancia especificada}$...Ecuación 1

Donde:

n = número de parámetros

j = índice de un vértice

c = índice de vértice centroide

z_j y z_c = valores de la función objetivo para los vértices j y c respectivamente

b) Cuando se alcanza el número máximo de iteraciones especificadas por el usuario

Los parámetros representados por el mejor vértice cuando termina el algoritmo de ajuste son reportados como los valores de parámetros óptimos (US Army Corps of Engineers, 2015).

3.8. Función objetivo Nash Sutcliffe

La función objetivo (η) o el índice NS propuesto por Nash y Sutcliffe (1970), es una de las estadísticas más utilizadas en la literatura hidrológica (Jain & Sudheer, 2008). Dicha función se define como:

$$\eta = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_o - y_m)^2}{\sum_{i=1}^n (y_o - y_p)^2} \dots \text{Ecuación 2}$$

Donde η es el valor del índice NS, y_o y y_m son valores de flujo observados y calculados en el tiempo t , respectivamente, y_p es el valor promedio de los flujos observados y n es el número de datos.

Los valores del índice NS oscilan entre $-\infty$ y 1 (ajuste perfecto) (Krause, Boyle, & Båse, 2005). Para propósito de evaluación de los modelos, valores del índice NS mayores a 0,5 se consideran como buenos ajustes (Polebitski, Palmer, ASCE, & Waddell, 2011).

3.9. Función objetivo Error Medio Cuadrático (RMSE)

El error medio cuadrático o RMSE por sus siglas en inglés, es comúnmente utilizado en estadística para cuantificar la diferencia entre los valores predichos por un modelos y valores observados desde una referencia “real” (Hamedi & Fuente, 2015). El RMSE está expresado como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (X_c(t) - X_o(t))^2}{n}} \dots \text{Ecuación 3}$$

Donde $X_c(t)$ y $X_o(t)$ son ordenadas del hidrograma computado y observado, respectivamente, y n es el número de ordenadas (Sarkar, Goel, & Mathur, 2010).

3.10. Área de estudio

El río Bolo es de gran importancia para la economía del Valle del Cauca, ya que es fuente de agua para riego del cultivo de caña de azúcar en una de las cuencas prioritarias del departamento, y es este uno de los principales renglones económicos del departamento.

El río Aguaclara, es el principal afluente del río Bolo. La cuenca hidrográfica de Aguaclara está ubicada en los municipios de Pradera, Palmira y Candelaria, en el departamento del Valle del Cauca, Colombia; el presente estudio se realizó en la microcuenca

La Vega, cuya área de drenaje está inmersa en la microcuenca Chontaduro, perteneciente a la subcuenca Aguaclara (ver figura 3.5).

La microcuenca La Vega posee un área de 114,08 ha y una pendiente media del 21%.

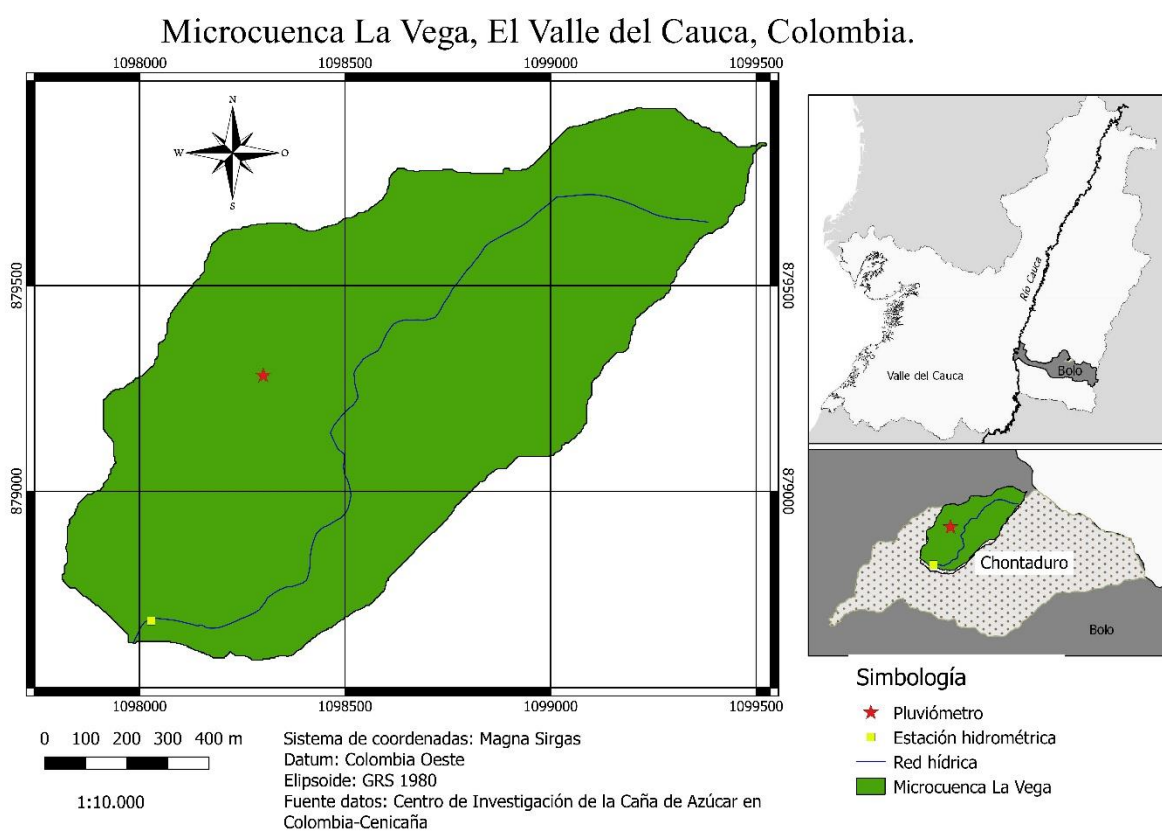


Figura 3.5. Ubicación área de estudio.

4. METODOLOGÍA

4.1. Datos empleados

Los datos de precipitación e hidrometría en la microcuenca de estudio, así como datos de número de curva calculados por tablas fueron medidos y proporcionados por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia-Cenicaña. Las precipitaciones en La Vega fueron registradas con un intervalo de 15 minutos, utilizando una estación meteorológica Davis Vantage pro-2 ubicada en las coordenadas 3°29'74,88823" N – 76°11'31,70352" O y a una altitud de 1607 m.s.n.m.

El monitoreo de caudales se realizó de forma continua en la estación hidrométrica de la microcuenca, compuesta por un sensor de nivel de agua (a través de un sensor de presión Acculevel marca Keller), instalado en un vertedero de cresta angosta para garantizar una sección de control y una medida precisa del caudal. Para convertir los datos de nivel en caudal se realizó mediante una curva de calibración previamente ajustada. Los datos fueron almacenados en un Datalogger con una resolución temporal de 15 minutos. En el cuadro 4.1 se pueden observar información de los eventos a evaluar.

Cuadro 4.1. Fecha de registro de los eventos a evaluar.

| Evento | Fecha | Precipitación acumulada (mm) | NC (tablas) | Clasificación humedad antecedente |
|--------|-----------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| 1 | 19-sep-15 | 24,892 | 58,164 | I |
| 2 | 7-nov-15 | 38,354 | 58,164 | I |
| 3 | 16-nov-15 | 36,322 | 58,164 | I |
| 4 | 7-mar-16 | 21,336 | 58,164 | I |
| 5 | 7-may-16 | 43,942 | 88,683 | III |
| 6 | 30-sep-16 | 69,342 | 58,164 | I |
| 7 | 22-oct-16 | 39,880 | 58,164 | I |
| 8 | 26-feb-16 | 36,830 | 58,164 | I |
| 9 | 11-mar-16 | 48,768 | 88,390 | III |
| 10 | 13-mar-17 | 67,818 | 88,390 | III |
| 11 | 28-mar-17 | 21,590 | 88,390 | III |
| 12 | 14-abr-17 | 21,844 | 58,164 | I |
| 13 | 25-abr-17 | 17,018 | 58,164 | I |
| 14 | 7-jun-17 | 29,464 | 58,164 | I |
| 15 | 17-jun-17 | 30,480 | 58,164 | I |

Posteriormente, se continuó con el proceso de modelación en el programa HEC-HMS, ingresando una aproximación de los parámetros de los distintos métodos para los procesos de pérdidas, transformación y flujo base, descritos en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Parámetros requeridos de los distintos métodos.

| Parámetros | Proceso | Método |
|--------------------------------|----------------|-----------------------------|
| Número de curva | Pérdidas | Número de curva |
| Relación al pico | Flujo base | Curva de recesión |
| Constante de recesión | Flujo base | Curva de recesión |
| Tiempo de concentración | Transformación | Hidrograma unitario Clark |
| Coefficiente de almacenamiento | Transformación | Hidrograma unitario Clark |
| Tiempo de retraso estándar | Transformación | Hidrograma unitario Snyder |
| Coefficiente pico | Transformación | Hidrograma unitario Snyder |
| Tiempo de retraso | Transformación | Hidrograma unitario del SCS |

Las aproximaciones iniciales de los distintos parámetros se realizaron de la siguiente manera:

- **Número de curva:** Como aproximación inicial se tomó el número de curva calculado por tablas proporcionado por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia.
- **Relación al pico, constante de recesión, coeficiente pico y coeficiente de almacenamiento:** Para estos parámetros se ingresaron valores iniciales entre los límites de cada parámetro. En el cuadro 4.3 se pueden observar los límites de cada parámetro dentro del modelo HEC-HMS, así como la aproximación inicial de cada uno.

Cuadro 4.3. Aproximación inicial de algunos parámetros.

| Parámetros | Límites del parámetro en el modelo | Aproximación inicial ingresada |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Relación al pico | 0 - 1 | 0,5 |
| Constante de recesión | 0,01 - 1 | 0,5 |
| Coefficiente de almacenamiento | 0 - 1 | 0,5 |
| Coefficiente pico | 0,1 - 1 | 0,5 |

- **Tiempo de concentración (Tc):** La aproximación inicial del tiempo de concentración se realizó mediante la siguiente ecuación.

$$Tc = 3,3 * L * \sqrt{S} \dots \text{Ecuación 4}$$

Donde Tc es el Tiempo de concentración en minutos, L es la longitud del recorrido del agua desde el punto hidrológicamente más alejado en metros, y S es la pendiente media del recorrido en metro por metro (Ibáñez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011). Dichos parámetros de la ecuación 4 fueron proporcionados por Cenicaña.

- **Tiempo de retraso y tiempo de retraso estándar:** La aproximación inicial de estos parámetros se calculó como el 60% del tiempo de concentración (Tc).

En la figura 4.1 se describe el procedimiento utilizado dentro del programa HEC-HMS. El programa inicia con el cálculo de pérdidas separando la precipitación neta que va a generar escorrentía directa. A partir de esta precipitación neta, mediante el proceso de transformación, se calcula la escorrentía directa. Posteriormente, el cálculo del flujo base suma a la escorrentía directa la escorrentía básica; además de calcular la evolución del flujo base a lo largo del tiempo. Una vez relajado este proceso, se realiza un proceso de ajuste del hidrograma computado con respecto hidrograma observado, variando el valor de los parámetros iniciales; llamado proceso de optimización, donde se describe de manera detallada más adelante en este apartado.

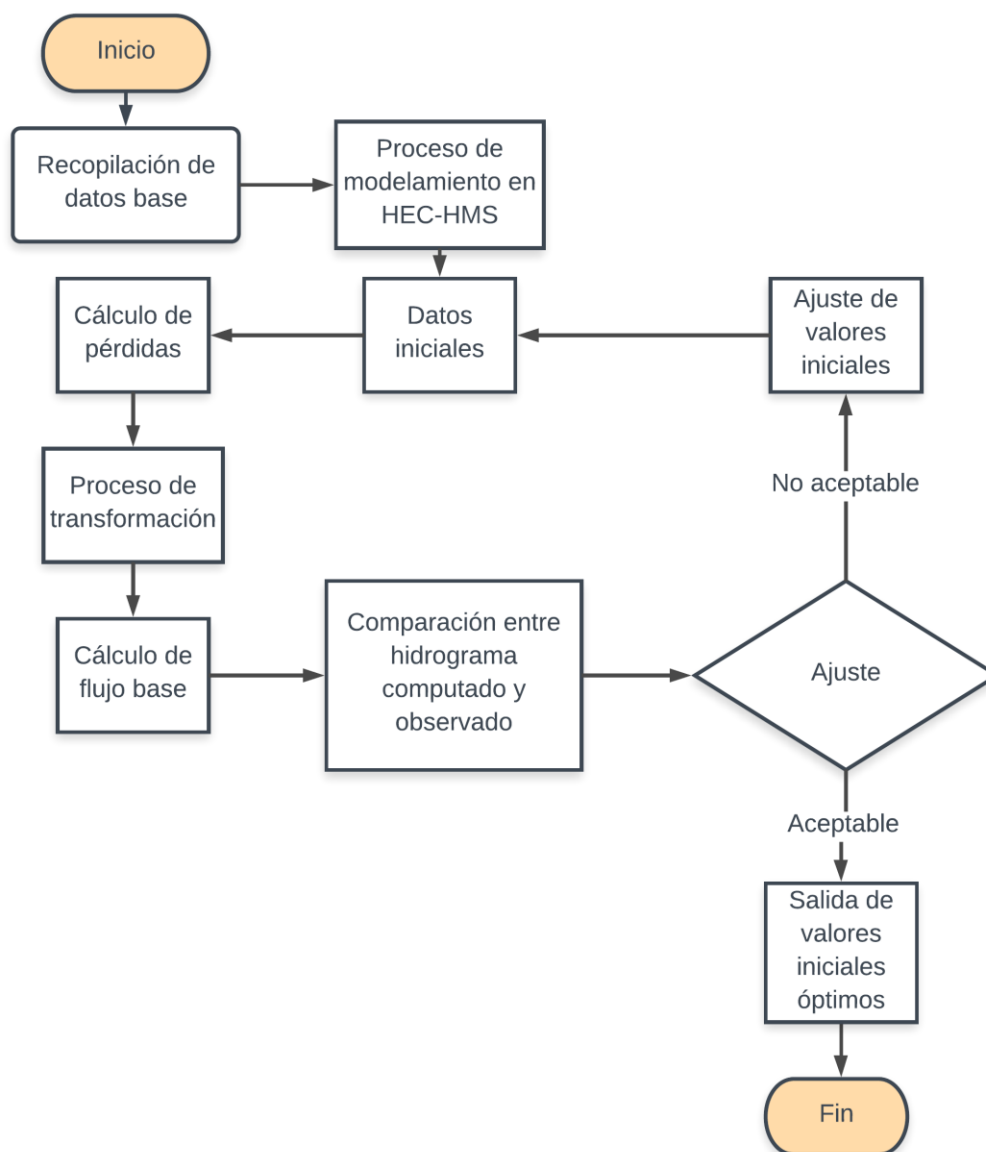


Figura 4.1. Procedimiento de cálculo HEC-HMS

4.2. Proceso de optimización o calibración en HEC-HMS

Ingresadas las estimaciones iniciales de los parámetros, los modelos incluidos en el programa se pueden usar con las condiciones de contorno observadas (precipitación o flujo ascendente) para calcular el rendimiento, ya sea el hidrograma de escorrentía de la cuenca hidrográfica o un hidrograma de salida del canal. En este punto, el programa compara el

hidrograma computado con el hidrograma observado. Por ejemplo, calcula el hidrograma representado con la línea anaranjada en la figura 4.2 y lo compara con el hidrograma observado representado con la línea azul. El objetivo de esta comparación es juzgar qué tan bien el modelo "se ajusta" al hidrograma real. Para comparar el hidrograma modelado con el hidrograma observado, el programa HEC-HMS utiliza las funciones objetivo o índices de bondad de ajuste. Las funciones objetivo utilizadas para este estudio fueron Nash Sutcliffe y el error medio cuadrático.

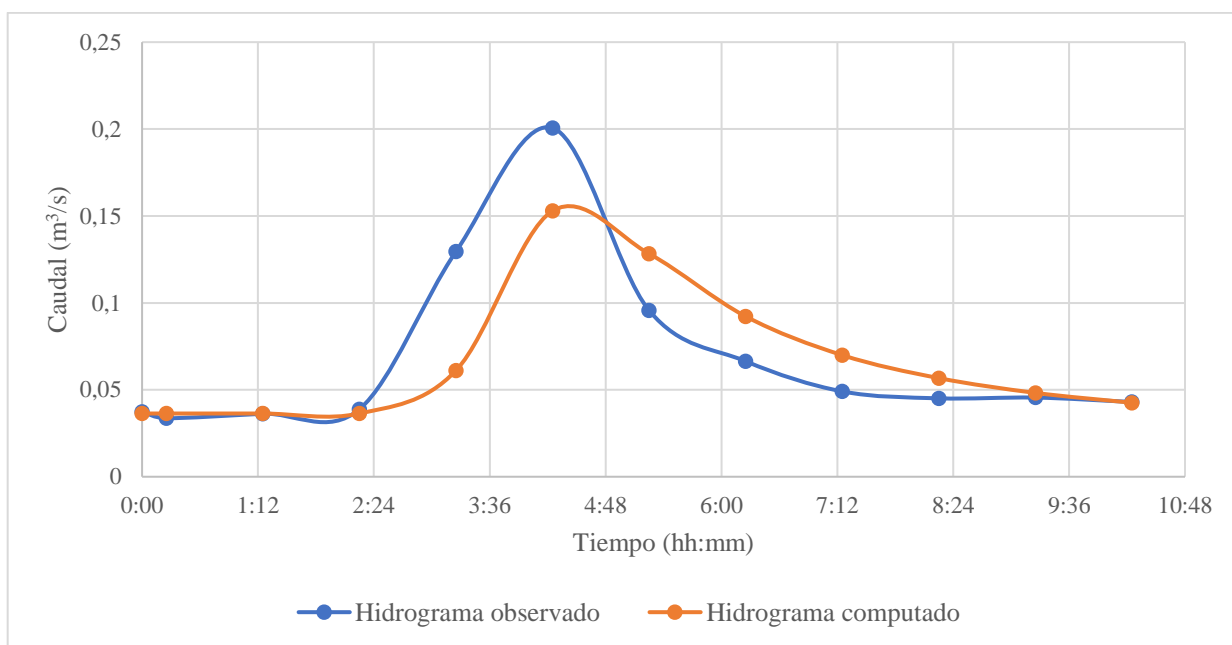


Figura 4.2. Comparación del hidrograma computado contra el observado.

Si el ajuste no es satisfactorio, el programa ajusta sistemáticamente los parámetros y lo reitera. El algoritmo utilizado para ajustar fue el de Nelder-Mead. Cuando el ajuste es satisfactorio, el programa informa los valores óptimos de los parámetros.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el cuadro 5.1 se pueden observar los valores Nash Sutcliffe de modelaciones de los eventos analizados utilizando el número de curva calculado mediante tablas. El coeficiente NS promedio para los eventos con un CHA I es de -1,403, en tanto para los eventos CHAIII es de -176,59, lo cual muestra que el hidrograma calculado obtenido mediante el número de curva calculado presenta grandes errores en comparación con el hidrograma observado, siendo los eventos CHA III los eventos con mayor error.

Cuadro 5.1. Información de modelaciones con número de curva de tablas.

| Evento | Clasificación humedad antecedente (CHA) | Nash Sutcliffe |
|---------------|------------------------------------------------|-----------------------|
| 1 | I | -0,367 |
| 2 | I | -1,361 |
| 3 | I | -0,465 |
| 4 | I | -0,375 |
| 5 | III | -215,395 |
| 6 | I | 0,563 |
| 7 | I | -1,492 |
| 8 | I | -0,554 |
| 9 | III | -286,936 |
| 10 | III | -145,157 |
| 11 | III | -58,876 |
| 12 | I | -5,327 |
| 13 | I | -0,155 |
| 14 | I | -4,429 |
| 15 | I | -1,478 |

En el cuadro 5.2 se pueden observar los errores en la estimación del caudal pico de modelaciones de los eventos utilizando el número de curva calculado mediante tablas. El error promedio para los eventos con un CHA I es de -0,135 m³/s, en tanto para los eventos CHAIII es de 5,649 m³/s, lo cual muestra que el hidrograma calculado obtenido mediante el número de curva calculado presenta errores en estimación del caudal pico, donde los eventos CHA I subestiman el caudal pico y los eventos CHA III sobreestiman el caudal pico.

Cuadro 5.2. Error caudal pico en los eventos

| Evento | Clasificación humedad antecedente (CHA) | Error caudal pico (m3/s) |
|---------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | I | -0,11369 |
| 2 | I | -0,18695 |
| 3 | I | -0,11584 |
| 4 | I | -0,10134 |
| 5 | III | 3,27753 |
| 6 | I | -0,07211 |
| 7 | I | 0,04931 |
| 8 | I | -0,23154 |
| 9 | III | 7,43741 |
| 10 | III | 10,52075 |
| 11 | III | 1,35863 |
| 12 | I | -0,14992 |
| 13 | I | -0,16425 |
| 14 | I | -0,08289 |
| 15 | I | -0,31608 |

Para el método de transformación del hidrograma unitario del SCS se decidió determinar el valor de factor de frecuencia máxima (PRF) óptimo para esta microcuenca , ya que dicho factor no es uniforme en todas las cuencas (Feldman, 2000). Se realizó mediante la modelación de 5 eventos con los distintos valores incluidos en el programa HEC-HMS y se seleccionó el que generaba menos error. En el cuadro 5.3 se pueden observar los valores de Nash Sutcliffe promedio de los 5 eventos para cada valor de PRF. Al ser el valor de 284 el que presentó un menor error, fue seleccionado para el uso en las modelaciones y procesos de optimización en la microcuenca.

Cuadro 5.3. Error promedio de los 5 eventos para los distintos PRF

| PRF | Valor promedio Nash Sutcliffe |
|------------|--------------------------------------|
| 100 | 0,78 |
| 150 | 0,8 |
| 200 | 0,87 |
| 250 | 0,87 |
| 284 | 0,88 |
| 300 | 0,86 |
| 350 | 0,86 |
| 400 | 0,85 |
| 450 | 0,85 |
| 484 | 0,85 |
| 500 | 0,84 |
| 550 | 0,84 |
| 600 | 0,83 |

Al iniciar con los procesos de optimización solo se decidió utilizar el parámetro del número de curva y los asociados a los distintos métodos de transformación, pero los hidrogramas calculados tenían errores en la curva de recesión del flujo base, al compararlo con el hidrograma observado, tal y como se aprecia en la figura 5.1. Por ende, se decidió incluir dentro de los parámetros de optimización la constante de recesión y la relación al pico del flujo base, obteniendo un mejor ajuste del hidrograma calculado con respecto al observado (ver figura 5.2)

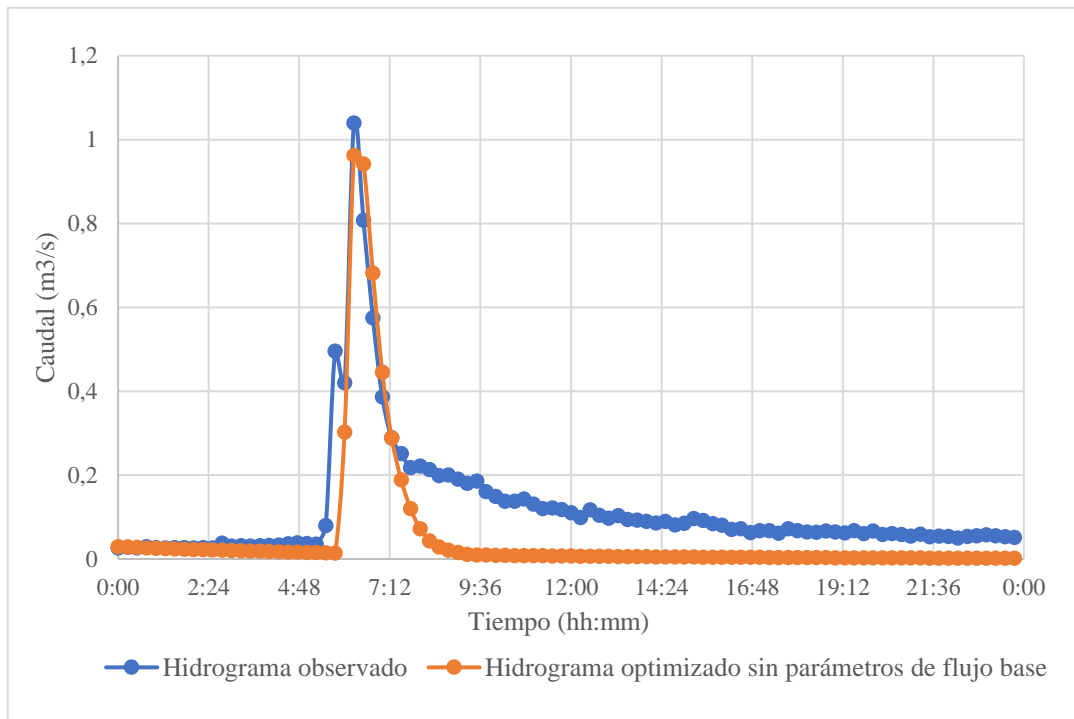


Figura 5.1. Hidrograma computado sin optimizar parámetros de flujo base contra hidrograma observado

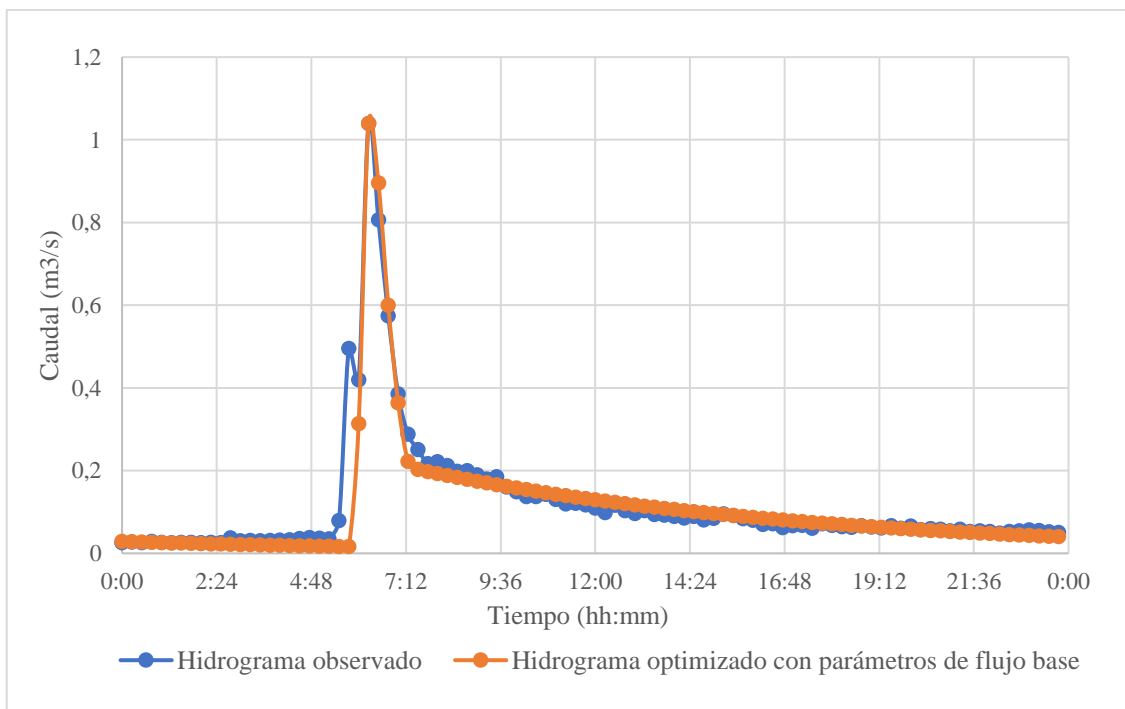


Figura 5.2. Hidrograma computado optimizando parámetros de flujo base contra hidrograma observado

Una vez realizados los procesos de optimización de los 15 eventos, se compararon los métodos de transformación. En la figura 5.3 se pueden observar los valores de la función objetivo Nash Sutcliffe de los distintos métodos de transformación. Dichos resultados muestran, cómo el hidrograma unitario del SCS posee un valor de la función objetivo mayor en 13 de los 15 eventos. Lo anterior confirma que el hidrograma unitario de SCS es el método de transformación que simula los flujos de una mejor manera, seguido por el hidrograma unitario de Snyder y por último el hidrograma unitario de Clark, concordando con los resultados obtenidos de otros estudios donde también comparan estos métodos (Dastorani et al., 2011; Güçlü & Şen, 2016; Halwatura & Najim, 2013; Rathod et al., 2015; Wałęga et al., 2011). Además, se observa que según el criterio de evaluación de Nash Sutcliffe, al comparar los hidrogramas modelados y los hidrogramas observados de cada uno de los eventos, se tienen valores superiores a 0,25, lo cual indica que el proceso de optimización de parámetros ajusta de buena manera el hidrograma modelado con respecto al observado, convirtiendo el ajuste del número de curva mediante procesos de optimización; en una buena alternativa para lograr mejores resultados en la estimación de la escorrentía mediante este método, así como lo sugieren estudios anteriores (Ajmal, Moon, et al., 2015).

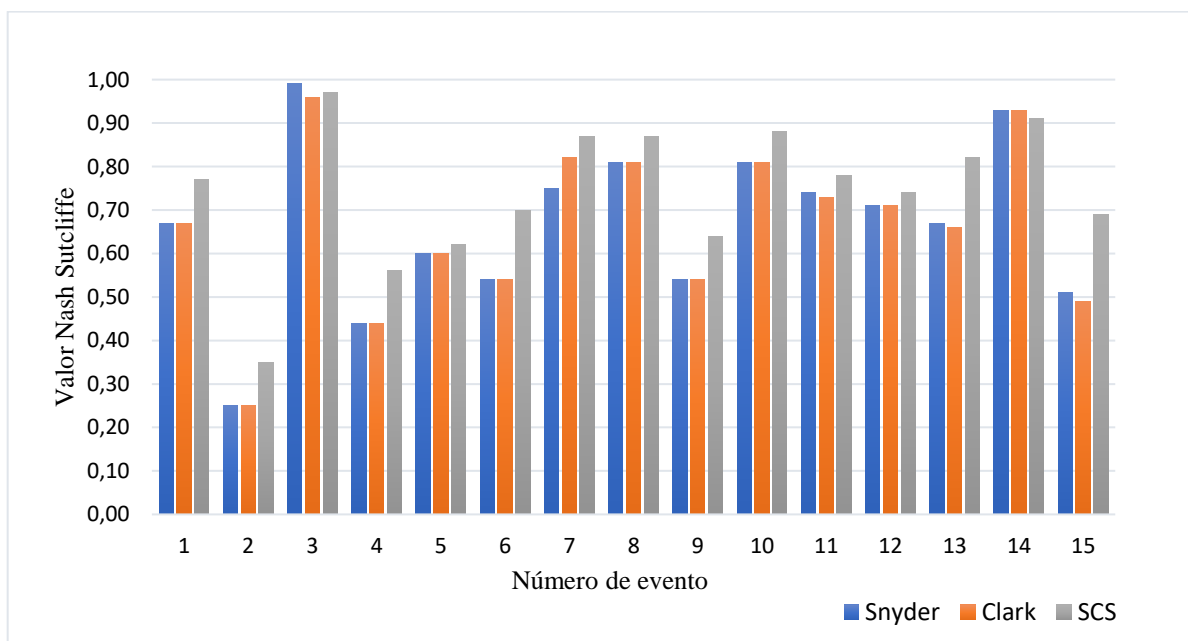


Figura 5.3. Valor de Nash Sutcliffe para cada evento.

Posterior a los procesos de optimización, se observó una tendencia decreciente de los valores de número de curva conforme aumenta la precipitación acumulada en los eventos (ver figura 5.4). Dicha relación se debe a que, al no ser puesto a calibrar el parámetro de abstracciones iniciales del método del número de curva, el programa automáticamente lo toma como 0,2 del potencial de retención, calculado a partir del número de curva. Por lo cual, es posible afirmar que las abstracciones iniciales mantienen una relación directa con el número de curva y si se cuenta con valores de precipitación acumulada y de número de curva bajos, el programa sin proceso de calibración no refleja escorrentía; ya que se tiene un potencial de retención muy alto. Sin embargo, como se tiene registro de escorrentía observada durante el proceso de optimización, el programa aumenta el número de curva para disminuir las abstracciones iniciales y de esa manera ajustar la escorrentía modelada con la escorrentía observada.

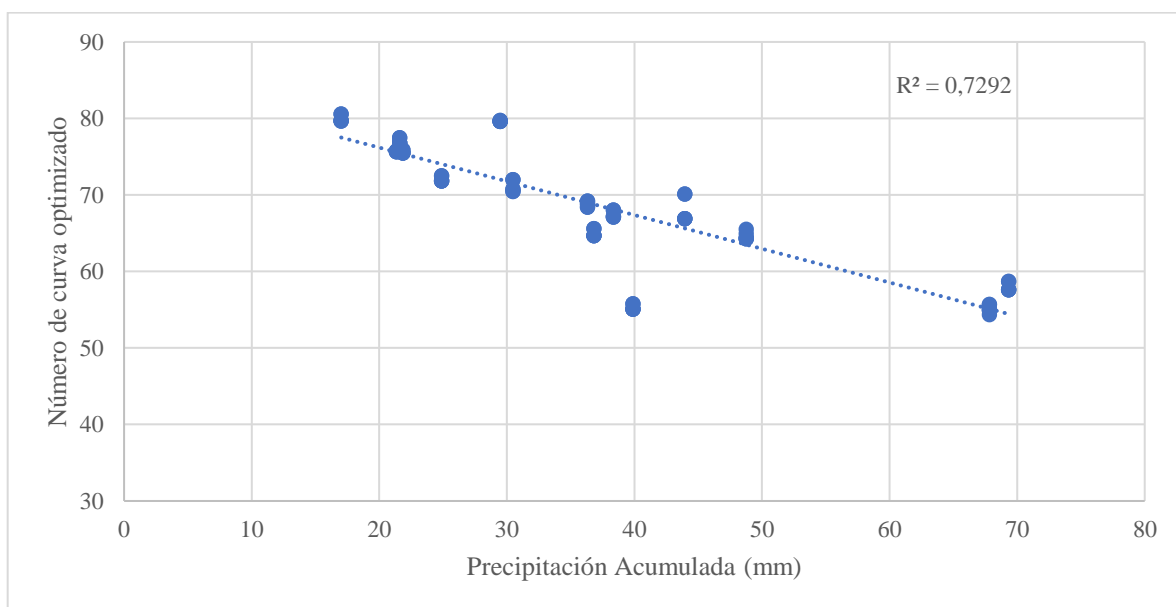


Figura 5.4. Número de curva optimizado contra precipitación acumulada.

En la figura 5.5 se observa que los valores de número de curva calculados por tablas y los optimizados por el programa no mantienen ninguna relación. Además, se muestra cómo el número de curva calculado por tablas posee únicamente dos valores, los cuales representan eventos para una misma corrección de humedad antecedente. En los valores de número de curva

optimizados no se observa esta misma relación, ya que toma distintos valores de número de curva para todos los eventos.

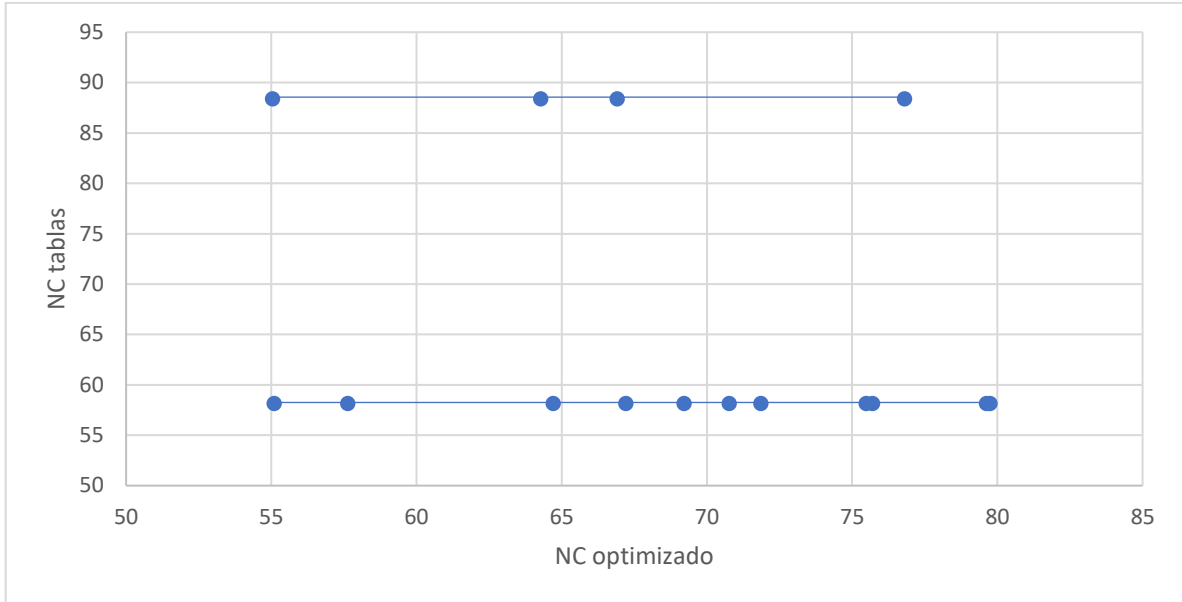


Figura 5.5. Número de curva de tablas contra número de curva optimizado

La figura 5.6 representa la función objetivo del error cuadrático medio, como criterio de evaluación entre los procesos de optimización de los diferentes hidrogramas unitarios.

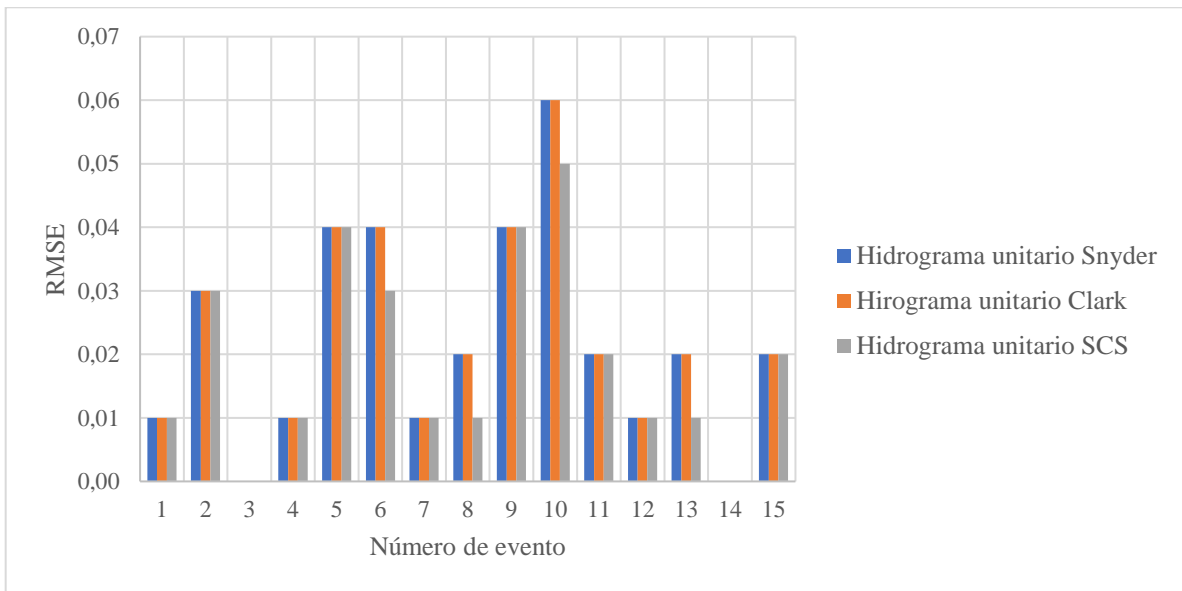


Figura 5.6. Valor de la función objetivo RMSE para los métodos de transformación de cada evento.

Tal y como se puede observar (ver figura 5.6); este valor es igual entre los distintos métodos de transformación para un mismo evento, lo cual dificulta la decisión sobre cuál es el que simula de una mejor manera los flujos observados; motivo por el cual se utilizó la función objetivo Nash Sutcliffe para llevar a cabo dicha comparación.

6. CONCLUSIONES

- Los hidrogramas obtenidos mediante las modelaciones realizadas por el método de número de curva calculado por tablas generan grandes errores, ya que existen variaciones significativas entre las condiciones para las cuales fue diseñado este método y las presentes en el área de estudio.
- Los eventos con clasificación de humedad antecedente CHA I y CHA III subestiman y sobreestiman el caudal pico, respectivamente.
- De los valores de frecuencia máxima (PRF) incluidos en el programa HEC-HMS, se obtuvo que 284 es el más apto para esta microcuenca, ya que logra de una mejor manera que los flujos modelados se asemejen más a los observados.
- Al agregar al proceso de optimización los parámetros de flujo base, se obtuvieron mejores resultados en el cálculo de los hidrogramas modelados con respecto a los hidrogramas observados.
- En el proceso de calibración, el programa otorga a los eventos con pequeñas precipitaciones acumuladas un valor de número de curva alto, para disminuir las abstracciones iniciales y de esta manera ajustar la escorrentía calculada con la observada. Por lo tanto, existe una relación donde el valor de número de curva optimizado por el programa decrece conforme la precipitación acumulada aumenta.
- Como método de transformación, el hidrograma unitario del SCS simula de manera más confiable los flujos observados en el área de estudio, seguido por el hidrograma unitario de Snyder y por último el hidrograma unitario de Clark.
- Los valores de curva optimizado no tienen relación con los del número de curva calculado por tablas, lo cual indica que la relación de humedad antecedente no está presente en los datos del número de curva optimizado.
- La función objetivo de RMSE presenta los mismos valores para la modelación de distintos métodos de transformación en un mismo evento, por lo tanto, no puede ser utilizada como criterio de evaluación entre los distintos hidrogramas unitarios.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmad, M. M., Ghumman, A. R., & Ahmad, S. (2009). Estimation of Clark's instantaneous unit hydrograph parameters and development of direct surface runoff hydrograph. *Water Resources Management*, 23(12), 2417–2435. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9388-8>
- Ajmal, M., Moon, G. woo, Ahn, J. hyun, & Kim, T. woong. (2015). Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. *Journal of Hydro-Environment Research*, 9(4), 592–603. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.11.003>
- Ajmal, M., Waseem, M., Wi, S., & Kim, T. W. (2015). Evolution of a parsimonious rainfall-runoff model using soil moisture proxies. *Journal of Hydrology*, 530, 623–633. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.019>
- Caviedes-Voullième, D., García-Navarro, P., & Murillo, J. (2012). Influence of mesh structure on 2D full shallow water equations and SCS Curve Number simulation of rainfall/runoff events. *Journal of Hydrology*, 448–449, 39–59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.006>
- Dastorani, M. T., Khodaparast, R., Talebi, A., Vafakhah, M., & Dashti, J. (2011). Determination of the Ability of HEC-HMS Model Components in Rainfall-run-off Simulation. *Research Journal of Environmental Sciences*, 152, 790–797. <https://doi.org/10.3923/rjes.2011.790.797>
- Deshmukh, D. S., Chaube, U. C., Ekube Hailu, A., Aberra Gudeta, D., & Tegene Kassa, M. (2013). Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. *Journal of Hydrology*, 492, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.001>
- Ellouze-Gargouri, E., & Bargaoui, Z. (2012). Runoff Estimation for an Ungauged Catchment Using Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) and Copulas. *Water Resources Management*, 26(6), 1615–1638. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-9975-6>
- Feldman, A. D. (2000). Hydrologic modeling system HEC-HMS, Technical Reference Manual. *Technical Reference Manual*, (March), 145. <https://doi.org/CDP-74B>
- Gomez Isidro, S., & Gómez-Ríos, V. L. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). *DYNA*, 83(196), 213–222. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>
- Güçlü, Y. S., & Şen, Z. (2016). Hydrograph estimation with fuzzy chain model. *Journal of Hydrology*, 538, 587–597. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.057>
- Halwatura, D., & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*, 46, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- Hamed, A., & Fuente, H. R. (2015). Comparative Effectiveness and Reliability of NEXRAD

- Data to Predict Outlet Hydrographs Using the GSSHA and HEC-HMS Hydrologic Models. *World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems*, (July 1997), 1444–1453. <https://doi.org/10.1061/9780784479162.142>
- Horton, R. E. (1933). The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1), 446. <https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). Métodos para determinar el tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica. Retrieved from <http://riunet.upv.es/handle/10251/10779>
- Jain, S. K., & Sudheer, K. P. (2008). Fitting of Hydrologic Models: A Close Look at the Nash–Sutcliffe Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(10), 981–986. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:10\(981\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:10(981))
- Jeslin Drusila Nesamalar, J., Venkatesh, P., & Charles Raja, S. (2016). Managing multi-line power congestion by using Hybrid Nelder-Mead - Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization (HNM-FAPSO). *Applied Soft Computing Journal*, 43, 222–234. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.02.013>
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5(89), 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1), 112–147. <https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nourani, V., Roushangar, K., & Andalib, G. (2018). An inverse method for watershed change detection using hybrid conceptual and artificial intelligence approaches. *Journal of Hydrology*, 562(April), 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.018>
- Oleyiblo, J. O., & Li, Z. (2010). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering*, 3(1), 14–22. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.002>
- Petroselli, A., Grimaldi, S., & Romano, N. (2013). Curve-Number/Green-Ampt Mixed Procedure for Net Rainfall Estimation: A Case Study of the Mignone Watershed, IT. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.013>
- Polebitski, A. S., Palmer, R. N., ASCE, M., & Waddell, P. (2011). Evaluating Water Demands Under Climate Change and Transitions in the Urban Environment. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(May-June), 249–257.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR)

- Rathod, P., Borse, K., & Manekar, V. L. (2015). Simulation of Rainfall - Runoff Process Using HEC-HMS (Case Study : Tapi River , India). In *HYDRO 2015 INTERNATIONAL 20th International Conference on Hydraulics, Water Resources and River Engineering* (pp. 17–19).
- Sarkar, S., Goel, N. K., & Mathur, B. S. (2010). Performance investigation of nakagami-m distribution to derive flood hydrograph by genetic algorithm optimization approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, *15*(8), 658–666.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000220)
- Senthil Kumar, J., Charles Raja, S., Jeslin Drusila Nesamalar, J., & Venkatesh, P. (2018). Optimizing renewable based generations in AC/DC microgrid system using hybrid Nelder-Mead – Cuckoo Search algorithm. *Energy*, *158*, 204–215.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.029>
- Sepehri, M., Malekinezhad, H., Ilderomi, A. R., Talebi, A., & Hosseini, S. Z. (2018). Studying the effect of rain water harvesting from roof surfaces on runoff and household consumption reduction. *Sustainable Cities and Society*, *43*(September), 317–324.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.09.005>
- Shadeed, S., & Almasri, M. (2010). Application of GIS-based SCS-CN method in. *Water Science and Engineering*, *3*(1), 1–13. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.001>
- Straub, T. D., Melching, C. S., & Kocher, K. E. (2000). Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois, 36.
- U.S.D.A. (2007). Hydrographs. In *National Engineering Handbook* (p. 50). Washington, DC.
- US Army Corps of Engineers. (2015). HEC-HMS Hydrologic Modeling System. *User's Manual - Version 4.1 - CPD-74A*, (July), 1–600.
- Wałęga, A., Grzebinoga, M., & Paluszkiewicz, B. (2011). on Using the Snyder and Clark Unit Hydrograph for Calculations of Flood Waves in a Highland Catchment (the Grabinka River Example). *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, *10*(2), 47–56.