



ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS DEL MODELO SWMM Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO

SENSITIVITY ANALYSIS OF THE HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC PARAMETERS OF THE SWMM MODEL AND ITS APPLICATION IN URBAN DRAINAGE SYSTEMS

Karla José Guanipa Rivero¹; América Libertad Lugo Aguilar²; Jean Carlos Rincón Ortiz³

Recibido 13/09/2019; Aprobado: 02/12/2019

DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26994.66248>

RESUMEN

Los modelos de simulación son ampliamente utilizados para el diseño y gestión de sistemas de drenaje urbano, como el modelo de gestión de aguas pluviales *SWMM*. Sin embargo, la calidad de sus resultados está directamente relacionada con la calidad de los datos suministrados, ya que una incorrecta estimación de estos puede llevar a un comportamiento distinto al esperado en el caso real. Existe incertidumbre en muchos parámetros hidrológicos e hidráulicos de entrada del modelo, puesto que la mayoría de ellos son estimados y no se cuenta con datos medidos que permitan calibrarlo. En este trabajo se realiza un análisis de sensibilidad a diversos parámetros para detectar los más influyentes en la simulación de sistemas de drenajes urbanos. Consistió en variar localmente cada uno de los parámetros y evaluar su influencia en la variación de los caudales y niveles máximos en un punto de la Urbanización Copacoa, municipio Palavecino del Estado Lara, Venezuela. De los resultados obtenidos se concluye que para simulaciones de cuencas urbanas donde predominan las áreas impermeables, el método menos sensible para la generación del hietrograma de lluvia es el de bloques alternos, mientras que el de mayor variabilidad, es el hietrograma triangular. Respecto al componente cuenca los parámetros más sensibles son el porcentaje de área impermeable, la pendiente de la cuenca y el coeficiente de *Manning* asignado al área impermeable. En relación al conducto, el parámetro coeficiente de *Manning*, también presentó una sensibilidad apreciable, pero de menor magnitud en comparación a los obtenidos para el componente cuenca.

Palabras clave: drenaje urbano, *SWMM*, parámetros hidrológicos, parámetros hidráulicos

¹Karla José Guanipa Rivero. Ingeniero Civil. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Correo: karlagrivero@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5289-0672>

²América Libertad Lugo Aguilar. Ingeniero Civil. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Venezuela. Correo: libertad91alla@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4297-0588>

³Jean Carlos Rincón Ortiz. Docente Investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Ingeniero Civil. MSc. en Ingeniería Hidráulica. Venezuela. Correo: jrcinco@ucla.edu.ve. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8294-5336>

ABSTRACT

Simulation models are widely used for the design and management of urban drainage systems, such as the *SWMM* Stormwater Management Model. However, the quality of its results is directly related to the quality of the data provided, since an incorrect estimate of these may lead to a different behavior than expected in the real case. There is uncertainty in many hydrological and hydraulic input parameters of the model, since most of them are estimated and there are no measured data to calibrate it. In this work a sensitivity analysis is carried out to various parameters to detect the most influential in the simulation of urban drainage systems. It consisted of locally varying each of the parameters and assessing their influence on the variation of the flows and maximum levels at a point in the Copacoa Urbanization, Palavecino municipality of the Lara State, Venezuela. From the results obtained, it is concluded that for simulations of urban watersheds where impervious areas predominate, the least sensitive method for the generation of the rain hietrogram is that of alternate blocks, while the one with the greatest variability is the triangular hietrogram. Regarding the basin component, the most sensitive parameters are the percentage of impermeable area, the slope of the basin and the *Manning* coefficient assigned to the impermeable area. In relation to the duct, the *Manning* coefficient parameter also presented an appreciable sensitivity, but of a lesser magnitude compared to those obtained for the basin component.

Keywords: *urban drainage, SWMM, hydrological parameters, hydraulic parameters*

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de simulación tanto hidrológicos como hidráulicos para las aguas de lluvia, son una forma resumida del sistema real. Sus objetivos son estudiar las operaciones que guardan relación entre las aguas pluviales, el escurrimiento superficial, y la red de recolección de las aguas de lluvia, pronosticando así los niveles de agua tanto en canales como en colectores [1]. En la actualidad, existen diversos software que ejecutan la simulación hidrológica e hidráulica, entre los que destaca el *EPA-SWMM* [2].

El Modelo de Gestión de Aguas Pluviales *SWMM* (Storm Water Management Model) es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones, que puede ser empleado para un único acontecimiento o realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, específicamente en alcantarillados urbanos [3]. Es el programa que más se destaca por su aplicación a nivel mundial, por su distribución gratuita, otorgando además rapidez de ejecución y visualización gráfica de los resultados permitiendo una mejor interpretación de los mismos, contribuyendo a los análisis de los casos de estudio y proyecto a realizar, por ello fue considerado el modelo a ser estudiado en el presente trabajo.

Sin embargo, a pesar de sus bondades, como todo programa de simulación, la calidad de sus resultados está directamente relacionada con la calidad de los datos suministrados, ya que una

incorrecta estimación de estos puede llevar a un comportamiento distinto al esperado en el caso real. En este particular, existe incertidumbre en muchos de los parámetros hidrológicos e hidráulicos de entrada del modelo puesto que la mayoría de ellos son estimados y no se cuenta con datos medidos que permitan calibrarlo.

Ante este problema, están los llamados análisis de sensibilidad, que son estudios que se realizan para saber qué variables de entrada influyen sobre el comportamiento de las salidas, con el fin de simplificar el problema, ya que de este modo se podrán reducir los posteriores estudios a aquellas entradas que hacen sensible a la salida seleccionada [4]. Debido a esto surge la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad a diversos parámetros involucrados en *SWMM*, a fin de detectar los cuales son los más influyentes en la respuesta del modelo en la simulación de sistemas de drenajes urbanos

2. DESARROLLO

2.1. Drenaje Urbano

El sistema de drenaje urbano son un conjunto de acciones, materiales o no, destinadas a evitar en la medida de lo posible, que las aguas pluviales causen daños a las personas o a las propiedades en las ciudades u obstaculicen el normal desenvolvimiento de la vida urbana [5].

2.2. Modelo de Gestión de Aguas Pluviales -Stormwater Management Model *SWMM*

Es un modelo dinámico de simulación de precipitaciones que se puede utilizar para un único acontecimiento o para realizar una simulación continua en periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, específicamente en alcantarillados urbanos. El módulo de escorrentía o hidrológico de *SWMM* funciona con una serie de cuencas en las cuales cae el agua de lluvia y se genera la escorrentía. El módulo de transporte o hidráulico analiza el recorrido de estas aguas a través de un sistema compuesto por tuberías, canales, dispositivos de almacenamiento y tratamiento, bombas y elementos reguladores [3].

El transporte de agua por el interior de cualquiera de los conductos representados en *SWMM* está gobernado por las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento tanto para el flujo gradualmente variado como para el flujo transitorio, es decir, las ecuaciones de *Saint Venant* [6].

2.3. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad es un estudio cuantitativo o cualitativo de las relaciones que existen

entre la información que ingresa y sale de un modelo, determinando los parámetros de entrada que más influyen en la variabilidad de la salida, y por lo tanto deben ser estudiados y analizados para fortalecer el modelo bajo estudio. Este análisis es utilizado para incrementar la confianza en el modelo y para investigar su robustez, como afirma [7]. Los métodos para realizar un análisis de sensibilidad se agrupan principalmente en dos clases: Los métodos locales y los métodos globales. Los primeros se concentran en un impacto local de los parámetros de entrada, por lo cual todos varían dentro de un rango de incertidumbre muy pequeño. Este método se puede considerar como un caso particular del *OAT* (one at a time), que es un procedimiento donde se varía solamente un parámetro al tiempo y los otros se mantienen constantes.

En los segundos, los parámetros de entrada son variados al mismo tiempo, dentro de rangos de incertidumbre diferentes, determinando de manera cuantitativa los parámetros de entrada que más afectan el desempeño del modelo según [8]. El análisis de sensibilidad crea varios estados operativos variando los parámetros de entrada y evalúa el comportamiento del modelo ante estas variaciones. Este análisis se realiza para representar circunstancias reales como medidas erróneas, falta de información o incertidumbre en los parámetros de entrada.

El análisis de sensibilidad determina:

- Si un modelo se asemeja al sistema o proceso bajo estudio.
- Los parámetros de entrada que más contribuyen a la variabilidad de la salida.
- Los parámetros de entrada que no influyen en el modelo y por lo tanto pueden ser excluidos del análisis [9].

3. METODOLOGÍA

La parte metodológica de la investigación se dividió en seis fases, las cuales se describen a continuación:

3.1. Selección del Caso de Estudio

Para la selección del caso de estudio se establecieron aspectos relevantes tales como: a) disponibilidad de la información del levantamiento topográfico, b) datos geométricos de la zona de estudio, c) aplicación y factibilidad del modelo matemático *SWMM* en drenajes urbano, d) estudio típico con condiciones reales de un urbanismo ubicado en el Estado Lara, e) caso que permita la aplicabilidad de un análisis de sensibilidad.

Resultando seleccionada la Urbanización Copacoa, ubicada en el municipio Palavecino del

Estado Lara, en Venezuela, el cual había sido analizado por [10] en un trabajo de investigación previo y cumplía con las condiciones antes señaladas. En Copacoa, se conducen las aguas pluviales de todo el urbanismo superficialmente a través de las distintas calles, hacia un sumidero de rejás conformado por 4 rejás tipo *INOS* [5] ubicada en el punto más bajo de la urbanización, y esta a su vez descarga hacia el Buco Mayalero.

3.2. Estructura del Sistema de Drenaje de la Urbanización Copacoa en SWMM

El sistema de drenaje del caso de estudio resultó esquematizado en *SWMM* a través de los componentes:

- Cuencas: que son los elementos del sistema que conducen la escorrentía directamente hacia el punto de descarga, para este caso se define el urbanismo Copacoa como una cuenca, y para obtener un mejor comportamiento en los resultados se divide en 160 subcuencas que representan cada parcela de la urbanización con sus respectivos puntos de salida.
- Conductos: son simbolizados por una línea, los cuales representan la sección transversal de la calzada, que sirve para conducir las aguas pluviales hacia la descarga.
- Nodos: son las conexiones del sistema de drenaje donde se conectan o confluyen diferentes líneas o conductos.
- Salida: Son dispositivos de control de caudal, en este caso está definida como un sumidero de reja de 4 rejás tipo *INOS* [5].
- Vertido: es el nodo terminal del sistema de drenaje utilizado para definir la condición de contorno final aguas abajo del sistema, en este caso, la descarga hacia el Buco Mayalero.

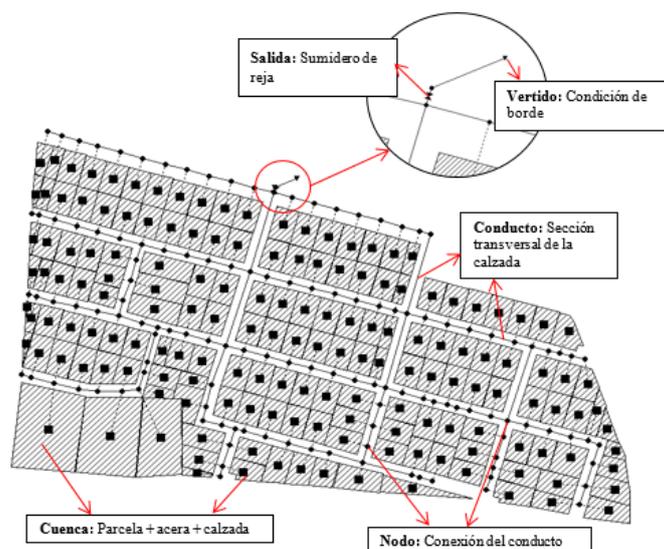


Figura 1. Esquema del sistema de drenaje en SWMM para la Urbanización Copacoa. Fuente: los autores

Finalmente, el sistema de drenaje quedó representado en *SWMM* como se muestra en la Figura 1.

3.3. Selección de los Parámetros a Evaluar

Basados en la estructura del software *SWMM* y en las propiedades correspondientes a cada uno de los componentes físicos del modelo, como lo son el pluviómetro, las cuencas, los nodos y los conductos, se realizó la selección de los parámetros físicos que serán objeto del análisis de sensibilidad. En la Tabla 1, se pueden visualizar los seleccionados tomando las recomendaciones de [11] y seguidamente se presenta una breve explicación de su significado dentro de *SWMM* y la razón de su escogencia.

Tabla 1. Parámetros seleccionados para el análisis de sensibilidad. Fuente: adaptado de [10]

Componente físicos	Parámetros
Pluviómetro	Duración total de la lluvia para distintos métodos de distribución temporal Δt para el Método de Bloques Alternos
Subcuenca	Ancho característico (m) Pendiente (%) Área impermeable (%) Coeficiente N de Manning (Impermeable) Coeficiente N de Manning (Permeable) Almacenamiento en depresión (Impermeable) (mm) Almacenamiento en depresión (Permeable) (mm) Área Impermeable sin Alm. en depresión (%) Infiltración
Línea	Coeficiente N de Manning
Nodo	Para este componente no se consideró ninguno de los parámetros de entrada para ser sometidos al análisis de sensibilidad. La razón para esta decisión se basó al considerar que los valores de entrada están relacionados con el levantamiento topográfico del terreno (caso de estudio) los cuales fueron procesados correctamente.

Componente: Pluviómetro – Parámetro: Duración total de la lluvia para distintos métodos de distribución temporal

Representa la duración total que tendrá la lluvia con la cual será evaluado el sistema de drenaje [10]. Fue seleccionado debido a que existen distintos métodos para la generación de la lluvia de diseño, como son el método de los bloques alternos, de la intensidad instantánea y el del Hietograma Triangular. Por otra parte, la duración total de la lluvia está asociada al tiempo de concentración de la cuenca, se estima mediante ecuaciones empíricas que no generan valores exactos, siendo en algunas ocasiones erróneo o llegando a ser sobrestimado o subestimado.

Componente: Pluviómetro – Parámetro: Δt para el Método de Bloques Alternos

El Δt dentro del método de bloques alternos representa el delta de tiempo que tendrá cada bloque del hietograma de lluvia, hasta alcanzar la duración de la lluvia [10]. Es un parámetro importante a evaluar ya que el mismo por lo general es escogido por el proyectista.

Componente: Subcuenca – Parámetro: Ancho característico

Para SWMM [3] este se define como el área de la cuenca entre la longitud del cauce principal, y considera que el flujo superficial escurre pendiente abajo de una subcuenca urbana idealizada como un plano rectangular, este ancho es perpendicular a la dirección del agua que drena. La razón principal de elección de este parámetro es que el agua que escurre por las viviendas puede tener distintos recorridos, es decir, que puede drenar en diferentes direcciones y la mayoría de veces se asume que la longitud del cauce corresponde al largo de la parcela, por lo antes expuesto este valor puede ser variable.

Componente: Subcuenca – Parámetro: Pendiente

Este parámetro se conoce como la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a aquellas superficies enmarcadas dentro de cada subcuenca [10]. En una cuenca hidrológica existen métodos para el cálculo de esta, sin embargo, en cuencas urbanizadas generalmente la pendiente es estimada mediante el criterio del ingeniero especialista, debido a la complejidad que se presenta al medir la pendiente en campo, lo cual genera cierta incertidumbre a los resultados del modelo, constituyendo un segundo criterio para el análisis de sensibilidad.

Componente: Subcuenca – Parámetro: Área impermeable

Es toda aquella superficie que impide que el agua generada por la precipitación sea adsorbida por el suelo [10]. Es un parámetro importante para el análisis de sensibilidad, ya que se pueden cometer errores en su estimación por ser un valor calculado por lo general a través de planos apoyados en fotografías aéreas para identificar los espacios.

Componente: Subcuenca – Parámetro: Coeficiente N de Manning

El coeficiente de Manning es el valor que identifica la rugosidad del material presente en la superficie estudiada [10], fue seleccionado por estar directamente relacionado con la escorrentía superficial cuya variabilidad depende de la rugosidad del material que cubre el área sea permeable o impermeable. Representando un valor difícil de estimar para el modelador, por los distintos materiales superficiales que pueden existir dentro de una parcela. Por esta razón es considerado un parámetro valioso para el análisis de sensibilidad propuesto.

Componente: Subcuenca – Parámetro: Almacenamiento en depresión

Es el estancamiento que se genera en las subcuencas cuando se produce una precipitación. El valor de la profundidad de almacenamiento en depresión expresa el volumen, en (mm), que debe ser llenado antes de la ocurrencia del escurrimiento. La razón asociada a la dificultad existente al momento de determinar su valor, es porque el agua puede quedar estancada en techos o terrazas que no posean una pendiente adecuada que permitan su escurrimiento, y calcular la magnitud de la profundidad de esa película de agua no es práctico, lo cual induce a la realización de su análisis de sensibilidad [10].

Componente: Subcuenca – Parámetro: Área Impermeable sin Almacenamiento en Depresión

Se define para indicar el porcentaje de área impermeable que no tiene almacenamiento en depresión [5]. Como en campo es prácticamente imposible determinar este parámetro, se requiere evaluar su impacto en los resultados

Componente: Subcuenca – Parámetro: Infiltración

Generalmente en Venezuela se aplica el modelo de infiltración basado en el número de curva de *SCS*, con este método se asume que la capacidad total de infiltración del suelo está asociada a un número de Curva quien a su vez depende de uso del suelo, cobertura vegetal y condiciones de humedad de la subcuenca al producirse la precipitación [6]. Estos atributos presentan grandes dificultades al momento de determinar con exactitud sus valores en las áreas urbanas permeables, por tal razón se someterá a un análisis de sensibilidad. Este parámetro de infiltración, está asociado dentro del modelo *SWMM*, a 3 subparámetros que son tiempo de secado del suelo, conductividad hidráulica saturada del suelo y el número de curva. Los 3 subparámetros fueron analizados.

Componente: Subcuenca – Flujo entre Subáreas

Como es poco probable conocer de manera certera la dirección del flujo en el modelo de transporte interno, y teniendo en cuenta que este parámetro es estimado a través de los planos de construcción del urbanismo, se propone realizar un análisis del mismo para evaluar su influencia en los resultados. Si se presume que existe flujo interno entre las áreas impermeable y permeable de la cuenca, el mismo puede ocurrir de las tres formas siguientes:

- Escorrentía desde al área permeable hacia la impermeable *IMPERV*
- Escorrentía desde el área impermeable hacia la permeable *PERV*
- Escorrentía desde ambas áreas directamente hacia la descarga *OUTLET*

Componente: Conducto – Parámetro: Coeficiente de rugosidad N de Manning

Finalmente, se presenta el parámetro Coeficiente de rugosidad N de Manning del elemento físico conducto, el recibe el valor relacionado a la resistencia del flujo en un canal determinado [10]. El mismo fue considerado porque no existe un procedimiento específico en la selección del valor para ser utilizado en los diseños de los conductos, para ellos se emplean cuatro formas que son: a) estimar el valor sobre la base del conocimiento de los factores que lo afectan, b) extraer el dato de tablas con valores típicos de "n", c) estimar "n" en base a la similitud del caudal que se estudia con casos conocidos, d) determinarlo mediante un proceso analítico sobre la base de la distribución teórica de las velocidades en la sección transversal del canal y de los datos de velocidad o medidas de rugosidad.

3.4. Hietogramas de precipitación

Para la generación de los hietogramas de precipitación se trabajó con los datos de lluvias máximas de la estación más cercana a la zona de estudio resultando la Estación Barquisimeto-Oficina (Serial: 1206; Latitud: 100355; Longitud: 691620; Altitud: 572) [10]. Con dichos datos se construyeron las curvas *IDF* y *PDF*. Luego, se seleccionó el período de retorno de trabajo, el cual se fijó en 2 años, en atención a la tabla de uso de la tierra y periodos de retorno para la función complementaria propuesto por [5] para zonas residenciales unifamiliares.

Posteriormente, teniendo como base las curvas *IDF* se aplicaron los métodos de Bloques alternos, intensidad instantánea e Hidrograma triangular según los procedimientos descritos por [6]. En el caso particular del método de intensidad instantánea, se usó un coeficiente de avance de tormenta igual a 0,41 encontrado en [12]. De esta manera se estimaron los distintos hietogramas de precipitación que fueron empleados para el análisis de sensibilidad

3.5. Rango de variación de los parámetros seleccionados

En la Tabla 2 se puede observar el rango de variación de cada parámetro objeto de análisis, el número de corridas ejecutadas y una columna de observaciones. Es importante mencionar que a partir del tercer parámetro se trabajó con un hietograma fijo construido por bloques alternos de 30 min de duración total y un Δt de 5 min.

Tabla 2. Resumen de rango de variación de los parámetros y número de corridas

Parámetros	Rango	Nº de Corridas	Observaciones
Duración total de la lluvia (min) para distintos métodos de distribución temporal	(BA-HT-II) (15 - 20 - 30 - 45)	12	Se hicieron corridas para 15, 20, 30 y 45 min de duración tomando en cuenta que el tiempo de concentración calculado por la fórmula de Kirpich dio un aproximado de 30 min. Esto se

Δt - Método de Bloques Alternos (min)	(1 - 10)	6	realizó para cada metodología BA: Bloques Alternos, HT: Hidrograma triangular, II: Intensidad instantánea Se hicieron corridas para tamaños de bloque desde 1 min hasta 10 min de duración
Ancho característico (m)	($V_i - 12,5\%$ - $V_i + 12,5\%$)	11	V_i corresponde al valor inicial, el cual equivale al ancho de cada parcela del urbanismo. Este valor fue modificado un 12.5% tanto por exceso como por defecto, para la realización de las corridas.
Pendiente (%)	(0,25 - 2)	8	Las pendientes de las parcelas fueron modificadas entre un 0,25% y 2%, que son valores esperados para estas pendientes.
Área impermeable (%)	($V_i + 10\%$ - $V_i + 100\%$)	11	V_i corresponde al valor inicial en % de área impermeable tomada de los planos de construcción del urbanismo. Ese valor inicial está entre 75 y 90%. Estos valores fueron incrementados hasta llegar al máximo de 100%
Coficiente N de Manning (Impermeable)	(0,012 - 0,017)	6	Valores referenciales tomados de [3]
Coficiente N de Manning (Permeable)	(0,11 - 0,16)	6	Valores referenciales tomados de [3]
Almacenamiento en depresión (Impermeable) (mm)	(0 - 2,5)	11	Valores referenciales tomados de [3]
Almacenamiento en depresión (Permeable) (mm)	(2,5 - 5)	11	Valores referenciales tomados de [3]
(%) Área Impermeable sin Alm. en depresión	50 - 100	11	Este parámetro fue modificado entre un 50% y 100% considerando que las parcelas no están diseñadas para no almacenar aguas pluviales.
Infiltración: Curva Número para áreas permeables	(61 - 80)	6	Valores referenciales tomados de [3] considerando prados en buenas condiciones para suelos entre B y D.
Infiltración: Conductividad hidra. Sat.(K) (mm/h)	(10,92 - 120,4)	6	Valores referenciales tomados de [3] considerando suelos desde limos hasta arenas.
Infiltración: Tiempo de secado (días)	(5 - 10)	6	Valores referenciales tomados de [3]
Flujo entre Subáreas	Impervious - Pervious - Outlet CN 61-80	18	Para el análisis, se varió la CN entre 61-80, para cada modelo de flujo entre subáreas
Coficiente N de Manning (Conducto)	(0,012 - 0,017)	6	Valores referenciales tomados de [3]
Total		135	

3.6. Análisis de Sensibilidad

Para este estudio se realizó un análisis de sensibilidad local, apoyado en la metodología de perturbación de parámetros propuesta por [13], es decir, se varía un parámetro del modelo mientras el resto permanecen constantes, de modo que las variaciones sufridas en las variables de estado reflejan la sensibilidad de la solución al parámetro modificado. Como resultado de

la simulación se seleccionaron dos parámetros de salida: Aporte Total o caudal que circula por la calzada en lps, y Nivel de agua en la calzada en cm.

Luego se seleccionó el nodo sobre el cual se realizaría este análisis, tomando en consideración que tuviera el mayor aporte de la cuenca y no estuviera directamente influenciado por la condición de borde aguas abajo, quedando ubicado como se muestra en la Figura 2, e identificado de ahora en adelante como el nodo D. Seguidamente, de los hidrogramas de caudales y niveles resultantes en el nodo D, con la variación de cada uno de los parámetros, se tomaron los caudales máximos y niveles máximos para cada valor del parámetro estudiado y se graficaron estos resultados, a fin de tener un primer análisis de la sensibilidad del parámetro.

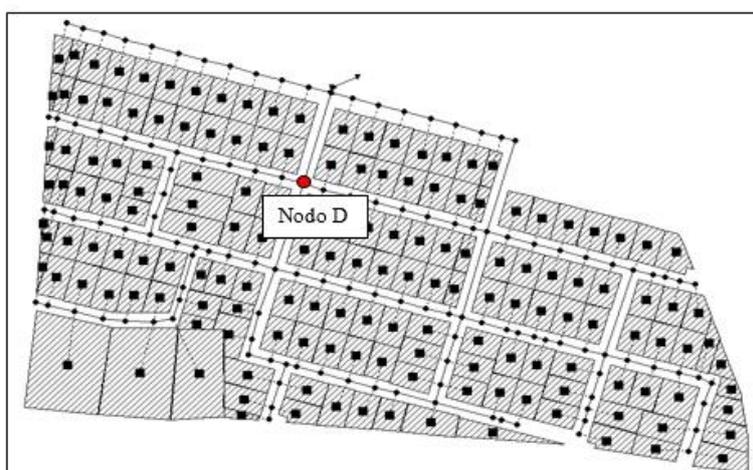


Figura 2. Ubicación del nodo seleccionado para el análisis. Fuente: los autores

Por último, para determinar los parámetros que presentan mayor sensibilidad en el estudio, se normalizaron todas las variables, es decir, fueron llevadas a una escala entre 0 y 1, donde 0 representa el valor mínimo asignado al parámetro en estudio y 1 el valor máximo asignado a dicho parámetro. Estos valores fueron graficados, y ajustados a una línea recta, donde la magnitud de la pendiente mediría el grado de sensibilidad del parámetro, en otras palabras, a mayor pendiente de la línea recta ajustada, mayor es la sensibilidad del parámetro a su variación.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los gráficos de caudales máximos y niveles máximos para el rango de variación de cada parámetro estudiado.

4.1. Componente: Pluviómetro - Parámetro: Duración Total de la Lluvia para Distintos Métodos de Distribución Temporal

Al observar la Figura 3 se puede apreciar que el método de intensidad instantánea genera

mayores caudales y niveles sobre la calzada a medida que aumenta la duración de la lluvia, debido a que trabaja con intervalos de tiempo muy pequeños produciendo intensidades muy altas. En tanto, el de bloques alternos presenta valores similares en sus resultados para las diferentes duraciones, lo que es entendible dado que el intervalo de trabajo independientemente de la duración total de la lluvia fue de cinco minutos, y los caudales máximos suelen estar influenciados en este tipo de cuencas, por el bloque central. Por último, se encuentra el hietograma triangular con caudales y niveles bajos con respecto a los otros dos, esto se debe a que está afectado por el tiempo de recesión td y al ser este mayor, las intensidades obtenidas son menores.

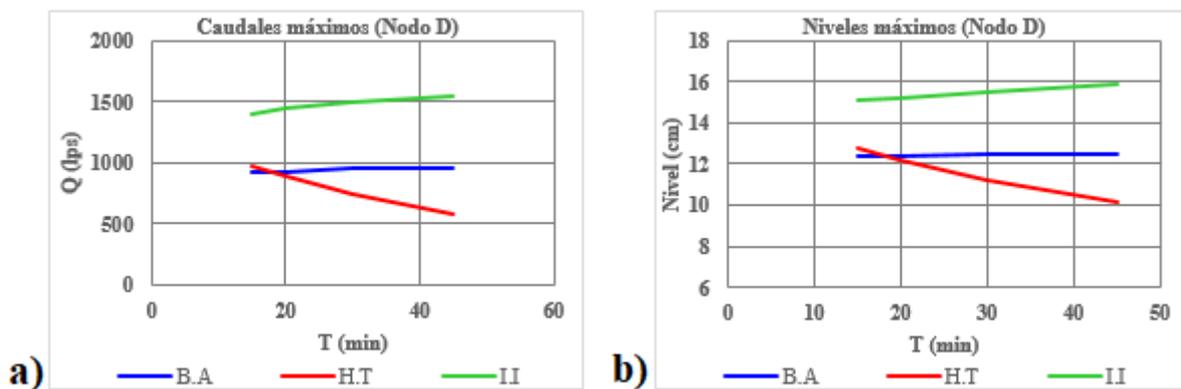


Figura 3. Duración total de la lluvia: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.2. Componente: Pluviómetro - Parámetro: Δt - Método de Bloques Alternos

En la Figura 4 se observa que a medida que el Δt aumenta, los caudales y niveles obtenidos disminuyen, lo que hace que en el método de bloques alternos el tamaño del bloque tenga alta incidencia en los resultados. Combinando este resultado con el parámetro anterior, se pudiera decir que el método menos sensible a la duración de la lluvia es el de bloques alternos siempre y cuando el tamaño del bloque Δt se mantenga constante.

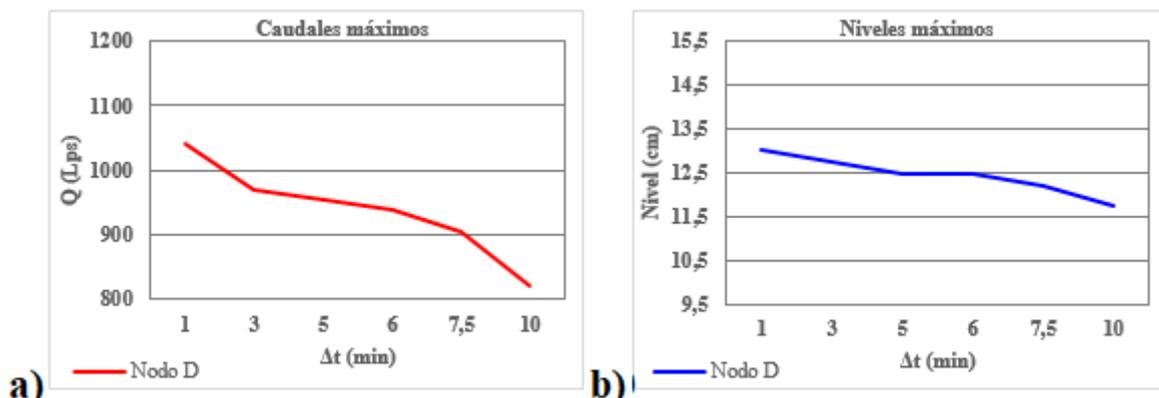


Figura 4: a) Δt Vs. Caudales Máximos, b) Δt Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.3. Componente: Subcuenca – Parámetro: Ancho Característico

Observando los valores de la Figura 5 se puede notar que en el nodo D los caudales máximos se van incrementando levemente a medida que el ancho característico aumenta, sin embargo, no se evidencia mayor variabilidad en los niveles. Esto es un indicador que para el análisis de sistemas de drenaje urbano, considerar el ancho igual al de la parcela no representa mayor incidencia en los resultados, si este valor no es exactamente el indicado.

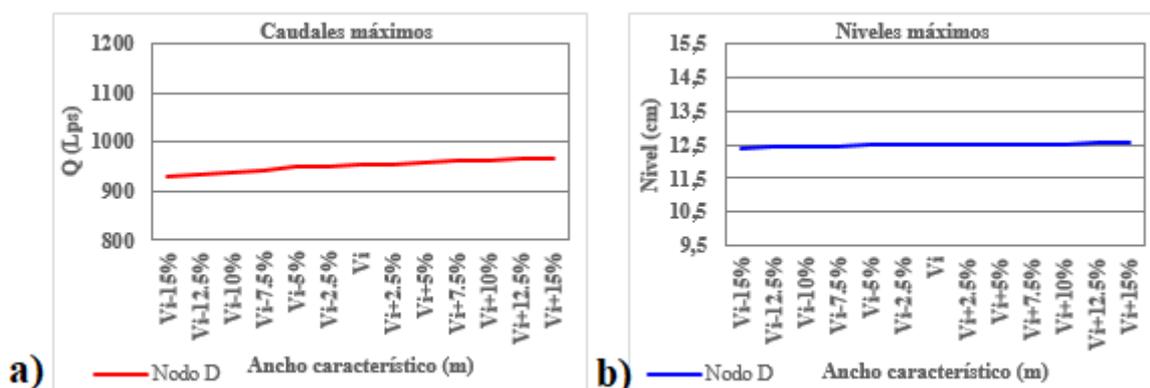


Figura 5. Ancho característico: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.3. Componente: Subcuenca – Parámetro: Pendiente

Para este parámetro se percibe en las Figura 6 un aumento de caudales y niveles a medida que la pendiente es mayor, pero también es notorio que a partir de 1,5% la curva se torna prácticamente horizontal, lo que hace que la variación de caudales y niveles máximos sea nula respecto al valor de la pendiente asignada a la cuenca representativa de la parcela.

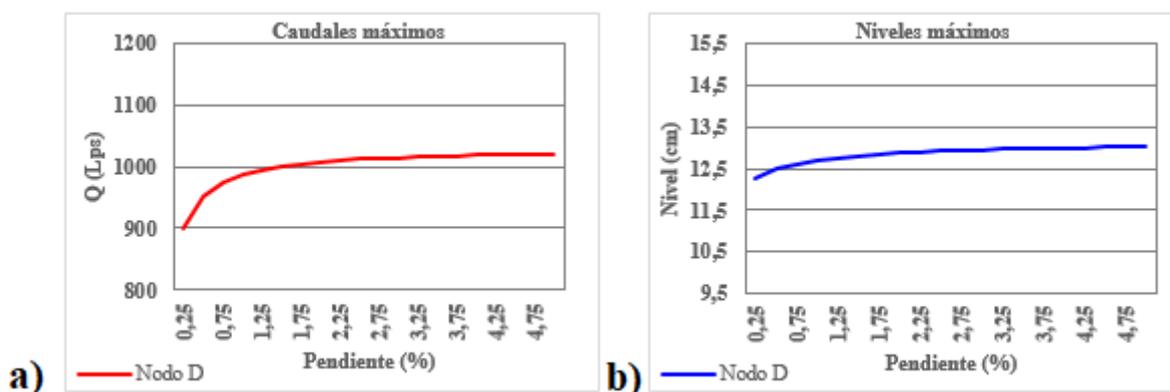


Figura 6. Pendiente de la subcuenca: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.4. Componente: Subcuenca – Parámetro: Área Impermeable

En este análisis, se puede apreciar en la Figuras 7, cambios significativos del caudal a medida que aumenta el porcentaje de área impermeable, al aumentar la impermeabilidad, disminuye la posibilidad de infiltración, y por consiguiente mayor escorrentía. Por lo tanto, es un

parámetro importante de precisar, para tener una buena estimación en el modelo.

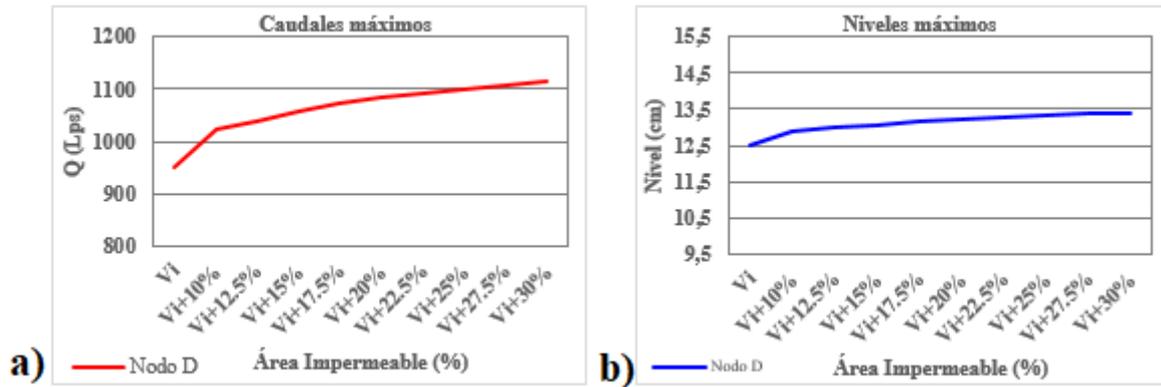


Figura 7. Porcentaje área impermeable: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.5. Componente: Subcuenca – Parámetros: Coeficiente N Impermeable y Coeficiente N Permeable

En la Figuras 8 se visualizan como disminuyen los valores de caudales y niveles máximos al tener un coeficiente de Manning, área impermeable mayor. Este comportamiento viene dado por la influencia que presenta la rugosidad de la superficie cuando está en contacto con el agua transportada, donde a mayor *N de Manning*, hay mayor resistencia al flujo, y por consiguiente los caudales picos son menores. En el caso del *N de Manning* para el área permeable se observa que para distintos valores de éste se refleja que cada punto sobre la gráfica tiene prácticamente el mismo valor (ver Figura 9).

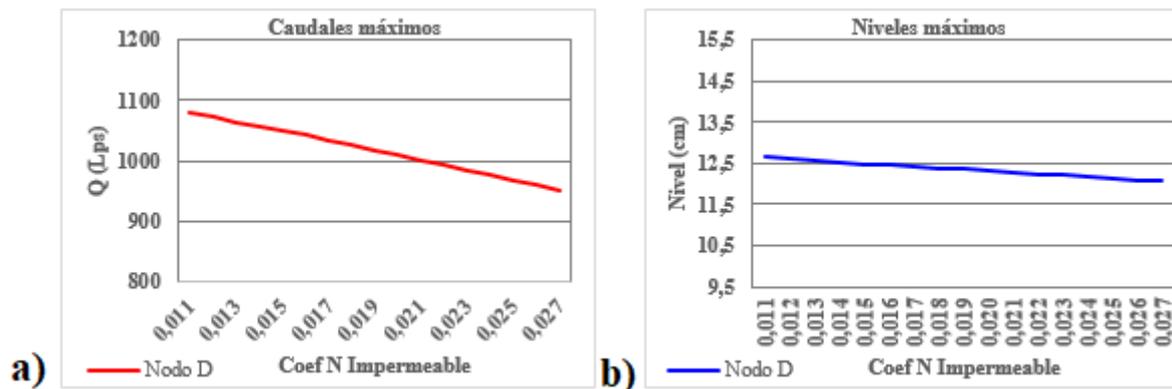


Figura 8. *N de Maning impermeable*: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

Las curvas se comportan de manera horizontal debido a la relación directa que tiene coeficiente n permeable con el porcentaje de área permeable que presenta el caso de estudio, el cual es muy pequeño.

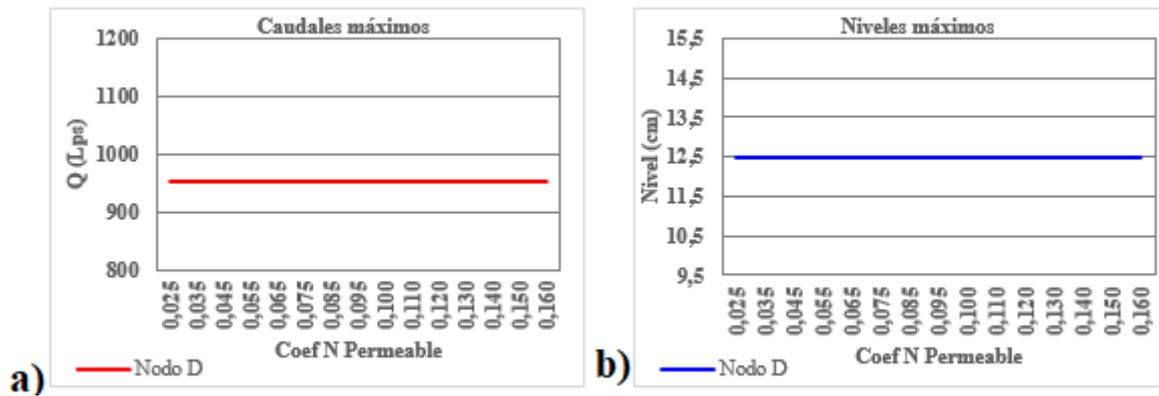


Figura 9. N de Manning permeable: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.6. Componente: Subcuenca – Parámetros: Almacenamiento en Depresión Impermeable y Permeable

De las Figuras 10 y 11 se puede concluir que estos dos parámetros son menos sensibles a su variación, ya que los valores de caudales y niveles máximos son muy similares.

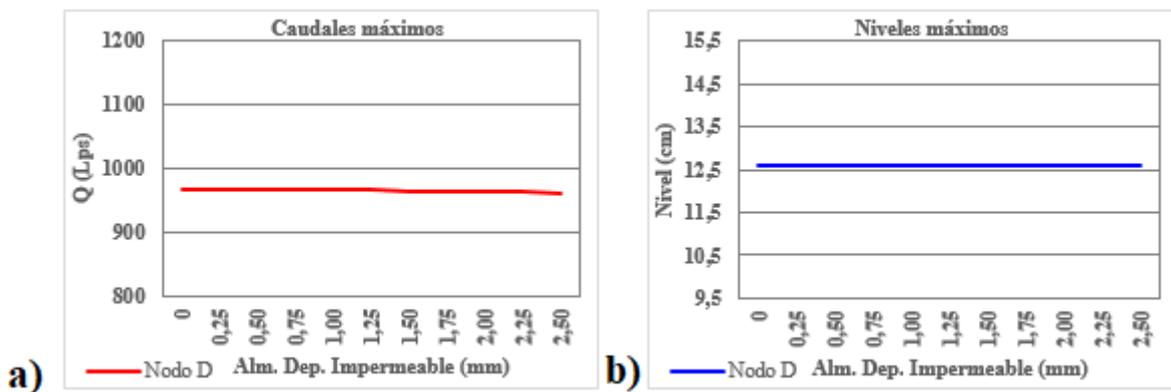


Figura 10. Alma en depresión impermeable: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

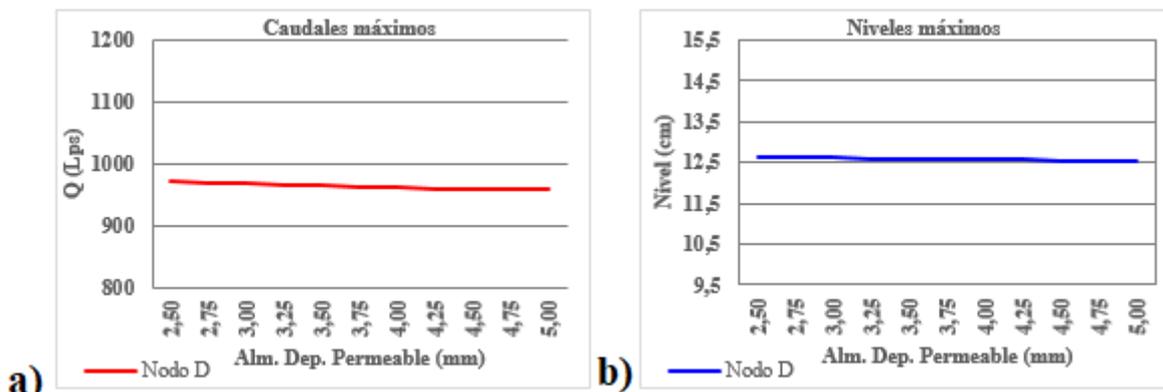


Figura 11. Alma en depresión permeable: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.7. Componente: Subcuenca – Parámetro: Infiltración

En las gráficas pertenecientes a este apartado, se visualizan los resultados de caudales y

niveles de la variación de las propiedades del parámetro infiltración, como son CN , K , y el tiempo de secado. Ellos no muestran ninguna variabilidad, se mantienen constantes en el mismo valor en todas las corridas.

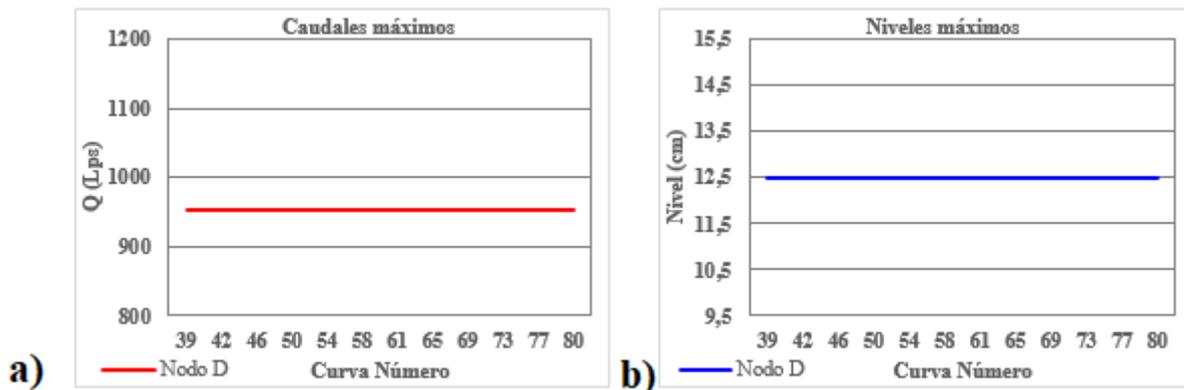


Figura 12. Curva número CN : a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

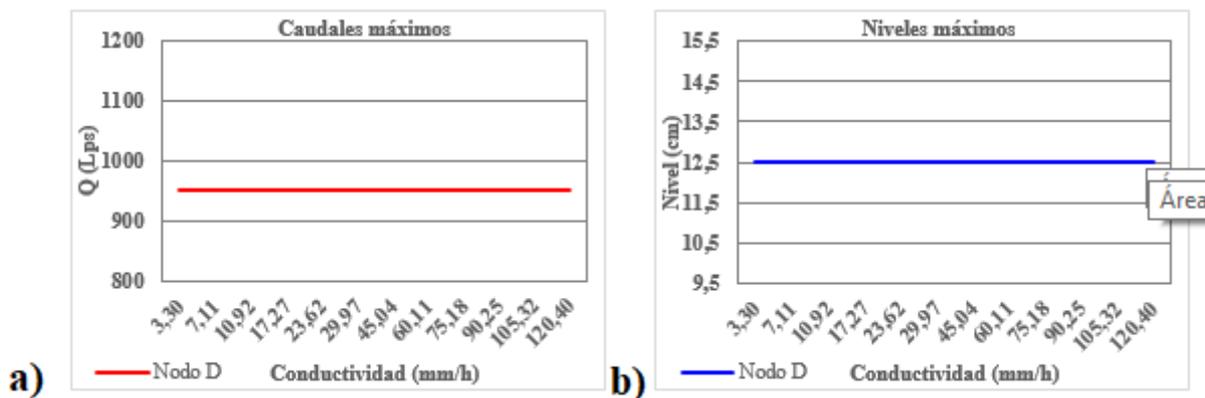


Figura 13. Conductividad K : a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

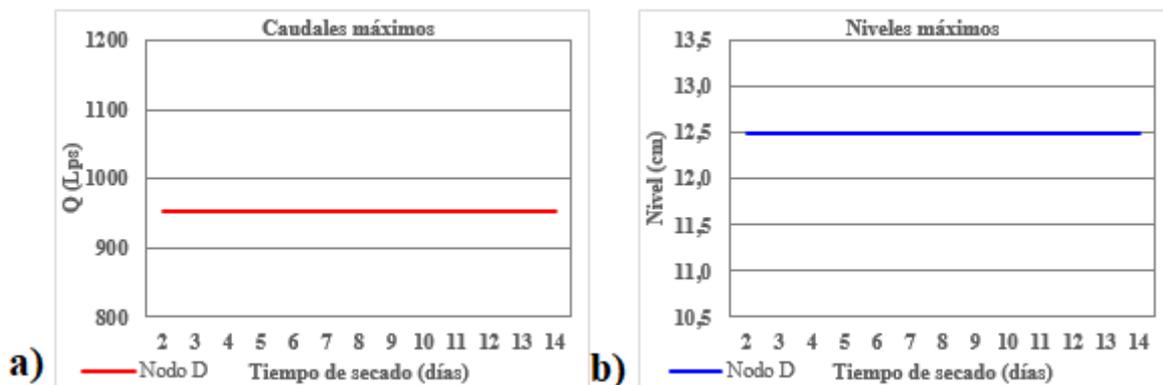


Figura 14. Tiempo de secado: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

En el caso de la conductividad es lógico dado que *SWMM* muestra una nota donde dice que no tomara en cuenta el valor designado para esta propiedad, en cuanto a la curva número esta se relaciona directamente con el área permeable y en el caso de estudio este porcentaje es muy pequeño por tanto, no tiene incidencia en el cálculo del aporte total y nivel de cada subcuena,

respecto al tiempo de secado, tampoco tiene incidencia en los resultados dado que las corridas realizadas son para periodos de tiempo cortos (2 horas).

4.8. Componente: Subcuenca – Parámetro: Flujo entre Subáreas (PERVIOUS- IMPERVIOUS-OUTLET):

En esta oportunidad se evaluó el comportamiento del caudal y nivel respecto a la curva número, pero introduciendo una variable adicional que es el flujo entre sub-áreas. Como puede apreciarse en la Figura 15 la variabilidad respecto a este parámetro es nula cuando el flujo entre sub-áreas es IMPERVIOUS, mientras que cuando es PERVIOUS o OUTLET, el caudal y nivel aumenta a medida que aumenta la curva número.

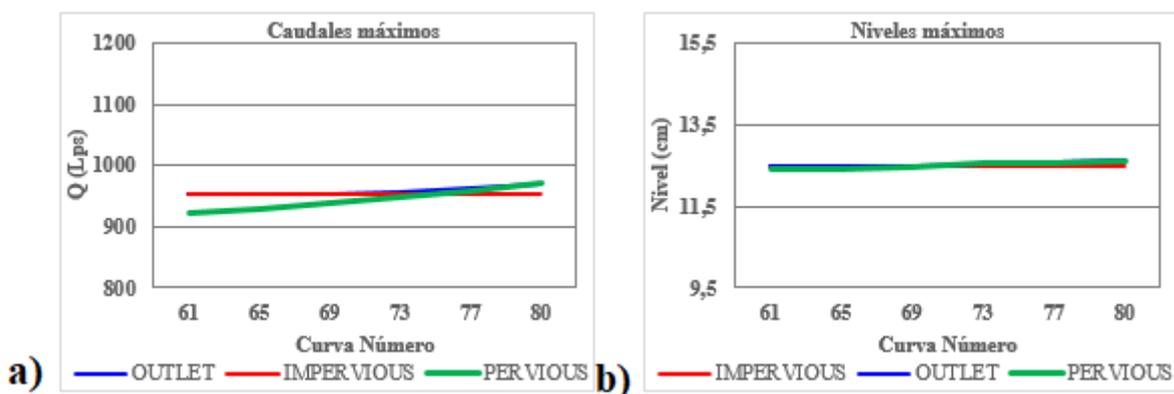


Figura 15. Flujo entre subáreas: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.9. Componente: Conducto– Parámetro: Coeficiente *N de Manning*

De la Figura 16 se puede desprender que a medida que el coeficiente de rugosidad de Manning en el conducto aumenta, los caudales máximos disminuyen pero los niveles máximos en el nodo D aumentan, esto se debe a que a mayor rugosidad, mayor resistencia al flujo.

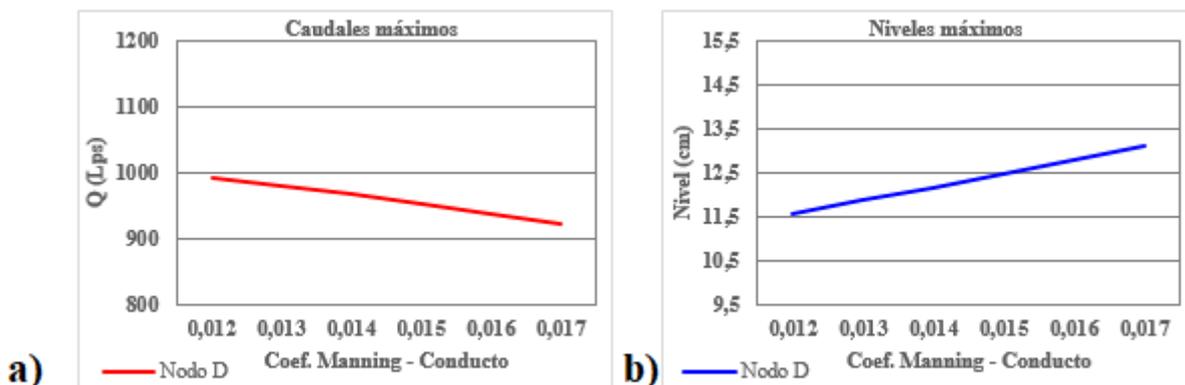


Figura 16. *N de Manning*: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

4.10. Análisis de Sensibilidad

Luego de normalizar los valores de los parámetros analizados en números comprendidos entre 0 y 1, para así poder hacer una comparación entre ellos, se hizo una regresión lineal de los datos con su respectiva ecuación de tendencia, para así tomar la pendiente de la recta, y usar este valor como indicador de cuan sensible es determinado parámetro a la variación del caudal máximo y nivel máximo en el nodo analizado. En la Figuras 17, se pueden observar los resultados obtenidos de este procedimiento para el componente conducto – parámetro: *N de Manning*, y en la Tabla 3 se pueden visualizar en su totalidad, los valores de pendientes obtenidos para cada uno de los parámetros analizados, en la que se pueden identificar claramente los parámetros con mayor sensibilidad.

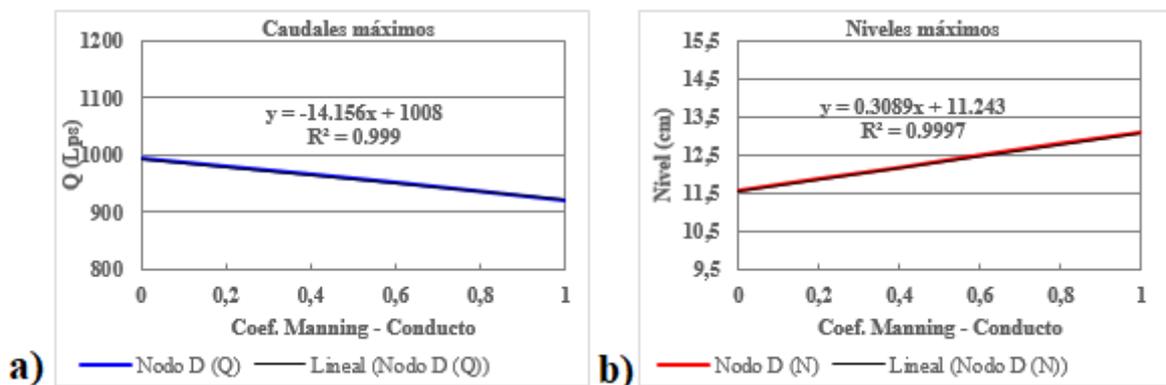


Figura 17. Cálculo pendiente línea de tendencia *N de Manning*: a) Vs. Caudales Máximos, b) Vs. Niveles máximos. Fuente: los autores

Tabla 3. Pendiente de los parámetros estudiados

Parámetro		Pendiente	
		Caudal (lps)	Nivel (cm)
Duración total de la lluvia para distintos métodos de distribución temporal	I.I	153,88	0,83
	B.A	40,79	0,12
	H.T	398,58	2,59
Δt para el Método de Bloques Alternos		37,46	0,23
Ancho característico (m)		29,81	0,11
Pendiente (%)		91,45	0,47
Área impermeable (%)		150,02	0,84
Coeficiente N de Manning (Impermeable)		40,03	0,18
Coeficiente N de Manning (Permeable)		0,00	0,00
Almacenamiento en depresión (Impermeable) (mm)		0,56	0,00
Almacenamiento en depresión (Permeable) (mm)		1,29	0,01
(%) Área Impermeable sin Alm, en depresión		2,22	0,00
Infiltración	Curva Número	0,00	0,00
	Conductividad (K) (mm/h)	0,00	0,00
	Tiempo de secado (días)	0,00	0,00

Flujo entre Subáreas	Impervious	0,00	0,00
	Pervious	47,95	0,33
	Outlet	17,72	0,03
Coeficiente <i>N de Manning</i> (Conducto)		14,16	0,31

5. CONCLUSIONES

Los análisis realizados a cada uno de los parámetros estudiados en este trabajo permitieron establecer las siguientes conclusiones, tomando en cuenta que las mismas están referidas al uso del modelo *SWMM* en la evaluación y diseño de sistemas de drenaje urbano donde predominan las áreas impermeables:

De los métodos analizados para la estimación de la lluvia, el que resultó con menor sensibilidad, es de bloques alternos. En contraparte, el método con mayor sensibilidad, incluido todos los parámetros analizados es el de hietograma triangular, por lo que no se recomienda usar este método en este tipo de estudios. La estimación del tamaño del bloque en el método de bloques alternos, presenta alta sensibilidad respecto a los resultados obtenidos en cuanto a caudales y niveles máximos, por esta razón se recomienda no emplear tamaños de Δt menores a 5 minutos, debido a que las curvas de intensidad-duración-frecuencia para tiempos muy pequeños, las intensidades tienden al infinito, consideración que no tiene ningún sentido físico.

Los parámetros que requieren mayor atención al momento de determinar su valor, de parte del modelador de sistemas de drenaje urbano en *SWMM* son: el porcentaje de área impermeable, este es el parámetro en relación al componente cuenca que presentó mayor sensibilidad, en segundo lugar se encuentra la pendiente de la cuenca y luego el coeficiente de rugosidad de *Manning* asignado al área impermeable. Respecto al componente conducto, el parámetro coeficiente de rugosidad de *Manning*, también presentó una sensibilidad apreciable, pero no mayores a las presentadas en los parámetros mencionados acerca del componente cuenca.

El parámetro infiltración deja de tener relevancia cuando en el estudio hay predominio de áreas impermeables, tal como se puede apreciar en los resultados presentados en la tabla 3. De igual manera, para estas condiciones, el flujo entre sub-áreas del tipo *pervious* es la que mayor sensibilidad presenta respecto a la variación de la curva número. También se puede concluir que para curvas números mayores a 75, el flujo entre sub-áreas que se seleccione no tiene gran relevancia. Se recomienda para próximos estudios, evaluar un urbanismo donde haya mayor porcentaje de áreas permeables, y así evaluar el impacto en los parámetros como la infiltración.

6. RECONOCIMIENTO

Este trabajo es producto del proyecto de investigación titulado: “Análisis de sensibilidad de los parámetros hidrológicos e hidráulicos del modelo SWMM para el diseño y evaluación de sistemas de drenajes urbanos”, registrado en El Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), bajo el código 1110-IC-2017

7. REFERENCIAS

- [1] Y. Castrillón, «Estrategias para el control de inundaciones en la zona urbana de la cuenca del río Meléndez» Trabajo de grado. Universidad del Valle Facultad de Ingeniería Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente Programa Académico de Ingeniería Sanitaria. Cali, Colombia, 2014
- [2] Environmental Protección Agency (EPA), «Software SWMM vE5.0» North Caroline, United States, <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>, 2005
- [3] Environmental Protección Agency (EPA), «User’s Manual, SWMM vE5.0» North Caroline, United States, 2005
- [4] M. San Isidro, «Proceso de validación de modelos de simulación» Informe Técnico. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid, España, 1998
- [5] J. Bolinaga. «Drenaje Urbano» Instituto Nacional de Obras Sanitarias, Caracas, Venezuela, 1979
- [6] V.T. Chow, «Hidrología Aplicada» Editorial McGraw-Hill interamericana, S.A. Santa Fe de Bogotá, Colombia, 1994
- [7] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo y M. Ratto, «Sensitivity analysis in practice» John Wiley & Sons Ltd. United Kingdom, 2004
- [8] N. Bilal, «Implementation of Sobol’s method of global sensitivity analysis to a compressor simulation model» 22 International compressor Engineering Conference, 2014
- [9] A. Saltelli, y K. Chan, «Sensitivity Analysis» John Wiley & Sons Ltd. United Kingdom, 2000
- [10] J. Rincón y M. Muñoz, «Diseño hidráulico de sistemas de drenaje dual a través del modelo SWMM» Revista: Ingeniería hidráulica y ambiental, vol 34, nº 2, pp. 103-117, 2013
- [11] L. Sánchez y Y. Martínez, «Sensibilidad y regionalización del parámetro impermeabilidad en una cuenca urbana» Revista: Tecnología y Ciencias del Agua, vol

Revista Gaceta Técnica. Artículo de Investigación. 21(1), 44-64, enero-junio, 2020
ISSN 1856-9560 (Impreso) ISSN: 2477-9539 (Internet) Depósito Legal pp 1999907LA22 ppi201602LA4730



4, nº 1, pp. 203-212, 2013 CSI Bridge, «Integrated 3-D Bridge Analysis», 2017

- [12] E. Guevara, «Patrón de distribución del hietograma de las tormentas en Venezuela» III Congreso de Investigación en la Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela, 2000
- [13] S. Chapra, «Surface water-quality modeling» McGraw-Hill, New York, United States, 1997