

Modelación del desempeño hidrológico de techos verdes en ciudades andinas tropicales usando SWMM¹

Jeniffer Tabares Catimay², Laura Marely Gallo Martínez³, Néstor Alonso Mancipe Muñoz⁴

Resumen

Introducción. La modelación hidrológica es una herramienta que permite analizar el efecto de diferentes condiciones climatológicas sobre la capacidad de retención de agua lluvia que presentan los techos verdes en áreas intertropicales.

Objetivo. Evaluar la capacidad del modelo SWMM para representar las dinámicas hidrológicas de techos verdes bajo condiciones experimentales de los Andes colombianos. **Materiales y métodos.** A partir del monitoreo de un módulo de techo verde extensivo en la Universidad de los Andes, Bogotá, se implementa, ejecuta un análisis de sensibilidad, calibra y valida el modelo. Una vez validado, se analiza el comportamiento del techo verde frente a simulación de tormentas continuas y tormentas con distinta intensidad, frecuencia y duración. **Resultados.** Se demuestra que el modelo calibrado está en capacidad de reproducir satisfactoriamente la escurrimiento

percolada a través del techo verde para tormentas individuales con índices de eficiencia cercanos a 0,80 para Nash-Sutcliffe (NSE) y menores al 6 % para el error de volumen de escurrimiento (RVE). De resultados de simulación, se determina que un incremento del 30 % de saturación inicial puede disminuir la capacidad de retención del techo verde entre el 10 al 17 % para las tormentas simuladas. **Conclusión.** Se demuestra que el software SWMM está en capacidad de representar las dinámicas de un techo verde experimental en las condiciones de los Andes colombianos al ser calibrado y validado correctamente. Por lo tanto, este modelo podría ser una herramienta útil para realizar análisis regionales respecto a la implementación de este tipo de SUDS en ciudades intertropicales.

Palabras clave: azoteas verdes, lluvia y régimen pluviométrico, escurrimiento, ciencias ambientales, modelación matemática.

1 Artículo original derivado del proyecto de investigación denominado Experiencias en el monitoreo continuo de techos verdes modulares extensivos. Financiado por los autores. Fecha de realización: entre 2017 y 2018.

2 Estudiante de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle, Bogotá – Colombia, e-mail: jtabares29@unisalle.edu.co; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2811-4304>.

3 Estudiante de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle, Bogotá – Colombia, e-mail: glaura93@unisalle.edu.co, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9023-3937>

4 PhD. en Ingeniería Ambiental. Ingeniero Ambiental y Sanitario. Profesor asistente. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá D.C., Colombia.

Autor para correspondencia: Néstor Alonso Mancipe, e-mail: nmancipe@unal.edu.co

Recibido: 19/03/2019 Aceptado: 29/07/2019.

Modeling of the hydrological performance of Green roofs in tropical Andean cities using SWMM

Abstract

Introduction. Hydrological modeling is a tool that allows analyzing the effect of different weather conditions on the retention capacity of green roofs in intertropical areas. **Objective.** The SWMM software's capacity is assessed in order to represent the hydrological dynamics of green roofs under experimental conditions in the Colombian Andes. **Materials and methods.** From the results of an extensive monitoring of a green roof module located at the Universidad de los Andes, Bogotá, a sensitivity analysis is conducted and a model is implemented, calibrated and validated. The validated model is used to assess the green roof behavior for simulation with continuous storms and storms with different intensity, frequency and duration. **Results.** It is demonstrated that the calibrated model is able to satisfactorily reproduce the runoff percolated through the green roof with efficiency indexes close to 0.80 for the Nash-Sutcliffe index (NSE) and less than 6 % for the runoff volume error index (RVE). From simulation results, it was determined that an increase of 30 % in initial saturation can decrease the retention capacity of the green roof between 10 % and 17 % for simulated storms. **Conclusion.** The SWMM software is capable of representing the dynamics of an experimental green roof in the conditions of the Colombian Andes when it is properly calibrated and validated. Therefore, this model could be a useful tool to perform regional analyzes regarding the implementation of this type of SUDS in intertropical cities.

Keywords: green roofs, rain and rainfall regime, runoff, environmental science, mathematical modeling.

Modelo do desempenho hidrológico de tetos verdes nas cidades andinas tropicais usando SWMM

Resumo

Introdução. A modelação hidrológica é uma ferramenta que permite analisar o efeito de diferentes condições climatológicas sobre a capacidade de retenção de água de chuva que apresentam os tetos verdes nas áreas intertropicais. **Objetivo.** Avaliar a capacidade do modelo SWMM para representar as dinâmicas hidrológicas de tetos verdes sob condições experimentais dos Andes colombianos. **Materiais e métodos.** A partir do monitoramento de um módulo de teto verde extensivo na Universidade dos Andes, Bogota, se implementa, se executa uma análise de sensibilidade, se calibra e valida o modelo. Depois de validado, se analisa o comportamento do teto verde frente a simulação de tormentas contínuas e tormentas com diferente intensidade, frequência e duração. **Resultados.** Se demonstra que o modelo calibrado está na capacidade de reproduzir satisfatoriamente o escoamento percolado através do teto verde para tormentas individuais com índices de eficiência próximos ao 0,80 para Nash-Sutcliffe (NSE) e menores ao 6% para o erro de volume de escoamento (RVE). A partir dos resultados da simulação, se determina que um incremento do 30 % de saturação inicial pode diminuir a capacidade de retenção do teto verde entre o 10 ao 17 % para as tormentas simuladas. **Conclusão.** Se

demonstra que o software SWMM está na capacidade de representar as dinâmicas de um teto verde experimental nas condições dos Andes colombianos ao se calibrar e validar corretamente. Por tanto, este modelo poderia ser uma ferramenta útil para realizar análises regionais respeito à implementação de este tipo de SUDS nas cidades intertropicais.

Palavras chave: tetos verdes, chuva e regime pluviométrico, escoamento, ciências ambientais, modelação matemática.

Introducción

Periodos de lluvia intensos en ambientes densamente construidos provocan altos niveles de escorrentía sobrecargando los sistemas de drenaje, causando inundaciones, deteriorando la calidad del agua y afectando la infraestructura de los sistemas de drenaje urbano. Uno de los factores que aumenta el exceso de escorrentía urbana es la falta de áreas verdes, debido a que estas disminuyen el tiempo de respuesta para la formación de la escorrentía, su ausencia desfavorece la infiltración y el almacenamiento de estas aguas (Palla and Gnecco, 2015).

En países de Primer Mundo se han desarrollado desde 1970 los sistemas urbanos de drenaje sostenibles (SUDS) como una estrategia de solución a las problemáticas asociadas al manejo del agua lluvia en zonas urbanas. Estos SUDS en Norteamérica adquieren también el nombre de *Best Management Practices (BMP)* y *Low Impact Development (LID)*. En este caso, los techos verdes (TV) filtran, retienen y almacenan agua lluvia (Oviedo and Torres, 2014). La modelación hidrológica de TV permite comprender el proceso de almacenamiento de agua, disminución de escorrentía urbana,

aplicaciones y limitaciones de estos SUDS, por lo tanto, sirve como herramienta para la toma de decisiones (Universidad Jorge Tadeo Lozano, 2018). La modelación de TV ha sido realizada exitosamente en ciudades que presentan estacionalidad tales como Toronto, Paris, Seattle, Portland, Vancouver, Auckland, New York, entre otras (Alfredo *et al.*, 2010; Bonoli *et al.*, 2013; Cipolla *et al.*, 2016). Sin embargo, en ciudades intertropicales como Bogotá, la investigación sobre TV es escasa debido a que los procesos de evapotranspiración e infiltración son totalmente diferentes en comparación con ciudades estacionales, adicional a lo anterior las investigaciones se encuentran relacionadas principalmente con montajes experimentales. Por lo tanto, el objetivo de este proyecto es evaluar la adaptabilidad del software *Storm Water Management Model (SWMM)* para representar las dinámicas hidrológicas de los TV bajo condiciones experimentales colombianas, para apoyar la investigación de esta tipología de SUDS. Se optó por utilizar el modelo EPA SWMM ya que permite modelar sistemas de control de desarrollo de bajo impacto (LID) mediante el módulo de LID control, es gratuito y de fácil manejo.

Materiales y métodos

A continuación, se presentan algunas generalidades del modelo SWMM 5.1, descripción de los módulos de TV experimentales, información hidroclimatológica, configuración del modelo, metodología de análisis de sensibilidad, de calibración y de validación, y se finaliza con los escenarios de simulación.

Generalidades del software SWMM

Previamente a esta investigación se seleccionaron varios modelos matemáticos que tuvieran antecedentes de simulaciones exitosas; Con estos modelos se realizó un proceso de selección aplicando la metodología AHP (Toskano.,2005) en el cual se consideraron distintas variables que pudieran ser evaluadas y determinar el mejor modelo matemático a utilizar, dicho estudio se encuentra actualmente en proceso de publicación y puede ser referenciado como Tabares *et al.*, 2018. Este software de gestión de aguas lluvias desarrollado por la US EPA se usa para simular la cantidad y calidad de la escorrentía generada en áreas con sistemas de drenaje urbano a través de modelos hidrológicos e hidráulicos. En la versión 5.1 se incorpora el módulo de LID control que permite simular distintas tipologías de SUDS asociados a una subcuenca, tales como cunetas verdes, pavimentos, permeables, techos verdes, entre otros.

Para los techos verdes el modelo dispone de tres capas en las cuales agrupa variables de superficie, sustrato y geotextil. Además, el modelo toma en cuenta la temperatura, la evaporación y la velocidad del viento. Cada LID se calcula por unidad de área, por lo cual se pueden ubicar varias réplicas de distintos tamaños en una misma subcuenca (US EPA, 2018).

Descripción de la información experimental

El Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes ha desarrollado varias investigaciones con montajes de TV modulares extensivos ubicados en la terraza del Bloque “IP” en el Departamento de Física y Geociencias (Ferrans *et al.*, 2018). Un proyecto desarrollado en el año 2015 (Pérez, 2015) es usado como base experimental de este proyecto. En esta investigación se tomaron los datos de percolación, variables hidroclimatológicas y variables del sustrato, registrados para el módulo 4. Este módulo cuenta con un área de 70 x 70 cm y una inclinación horizontal inferior al 1 %. La composición del módulo de TV desde la parte superior hasta la inferior es la siguiente: (1) plantas en la superficie (*Sedum* variedades *Sexangulare*, *Album*, *Acre*, *Reflexum* y *Kamtschaticum*); (2) sustrato o medio de cultivo (EXL-1), cuya caracterización medida experimentalmente por el CIIA se puede apreciar en la tabla 1; (3) Geotextil NO tejido Sika pp 1800; (4) Capa de drenaje Sika T-20 Garden; y (5) Módulo Metálica en *Cold-Rolled* de espesor 2 mm. El sustrato es de tipo aligerado con una base de 40 % de compost (porcentaje según volumen), cascarilla de arroz y materiales aligerados como triturado de pumice y carbón vegetal (Pérez, 2015).

Gráfico 1. Propiedades físicas Sustrato EXL-1

Nombre del parámetro	Parámetro	Valor
Densidad aparente seca	ρ_d (kg/m ³)	421
Porosidad	η (m ³ /m ³)	0,42
Punto de marchitamiento permanente	θ_{pmp} [-]	0,12
Capacidad de Campo	θ_{cc} [-]	0,32
Conductividad hidráulica saturada	K_{sat} (mm/hr)	95,46

Fuente: Experiencias en el monitoreo continuo de techos verdes modulares extensivos (Pérez, 2015).

Información hidroclimatológica

La información de temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar neta, velocidad y dirección del viento, fueron registrados por una estación de la marca Davis con una resolución temporal de 1 minuto. La precipitación y la escorrentía se midieron mediante pluviómetros de balancín con una precisión de 0,20 mm y una resolución temporal de conteo de pulsos cada 6 segundos (Pérez, 2015). Estos datos fueron agregados para obtener una resolución temporal de 1 minuto. La configuración de los TV ha sido modificada múltiples veces, por lo tanto, las características del sustrato mostradas en el Gráfico 1 sólo tienen validez para los meses de febrero y marzo del 2015. En este periodo sólo dos eventos generaron escorrentía, ocurridos el 24 de febrero y el 16 de marzo del 2015, dado que no se encuentran otros eventos de lluvia, este ejercicio académico debe ser contrastado en futuras investigaciones validando nuevas series de tiempo. En el análisis de sensibilidad y la calibración se empleó el evento del 16 de marzo dado que presenta mayor precipitación. Para este evento se registró una profundidad de 14,91 mm de precipitación, 11,80 mm de escorrentía, 2,60 mm de evapotranspiración y la capacidad de almacenamiento máxima del sustrato es de 25,60 mm. Para la validación se ejecutó el evento de lluvia ocurrido el 24 de febrero de 2015, este registró una profundidad de 8,61 mm de precipitación, 7,2 mm de escorrentía y 1,76 mm de evapotranspiración total. Con estos datos se realiza un balance hídrico para determinar el contenido de humedad inicial en el sustrato, luego este valor se convierte en porcentaje de saturación inicial. Esto debido a que, al ejecutar el modelo con un 0 % y 100 % de saturación inicial, se obtienen 9,60

mm y 36,40 mm de almacenamiento inicial, respectivamente, y se conserva una relación lineal.

Para realizar la simulación continua de eventos se emplea la información meteorológica del mes de marzo obtenida de la estación San Cristóbal Sur ubicada en la localidad de San Cristóbal. Se emplea otra estación climatológica debido a que en la zona solo se tenía registro de dos eventos de lluvia y se pretende analizar el efecto que tienen eventos de lluvia continuos sobre la saturación del sustrato. La estación elegida pertenece a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y es la más cercana al montaje de TV.

Para la simulación de tormentas sintéticas se utilizó la información de las curvas IDF de la estación del IDEAM más cercana a los TV llamada “Venado de Oro”, debido a que no se cuenta con información sobre otras curvas IDF elaboradas específicamente para la zona de estudio. La ecuación de la curva IDF que suministra el IDEAM para la estación Venado de Oro es la siguiente:

Gráfico 2. Ecuación de la curva IDF – Estación Venado de Oro.

$$\text{Ecuación N}^{\circ} 1 \quad i = \frac{3257.01 Tr^{0,15}}{D^{1,06} + 40,86}$$

Fuente: Caracterización de tormentas y actualizaciones de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (Ingetec and Empresa de Acueducto de Bogotá, 2014).

Donde es la intensidad de la lluvia de diseño (mm/h), Tr es el periodo de retorno (años) y D es la duración de la tormenta (min).

Se emplearon las curvas IDF para periodos de retorno de 5,50 y 100 años para generar hietogramas sintéticos de tormentas de

diseño con una duración de 6 horas, aplicando el método de bloque alterno descrito por (Chow *et al.*, 1994). Se emplean tormentas sintéticas puesto que son una herramienta útil para evaluar el desempeño hidrológico de estructuras al simular eventos de alta precipitación (Czemiel Berndtsson, 2010; Jato-Espino *et al.*, 2016), al utilizar eventos de precipitación real es posible que no haya claridad sobre el comportamiento del techo verde en eventos extremos (Versini *et al.*, 2015).

Configuración del modelo

La configuración del TV consiste en un módulo de LID que ocupa el 100% de la superficie y que drena a un sumidero, este representa al pluviómetro que registró la percolación del TV. Inicialmente, se configuran las propiedades de la subárea en el menú del *subcatchment* ingresando el área del techo y otros parámetros asociados al montaje experimental, tales como el porcentaje de inclinación, porcentaje de área impermeable (0,10 %), profundidad de almacenamiento en la zona permeable (10 mm), conexión al módulo de LID control y método de estimación de la infiltración (Green & Ampt Modificado). Dentro del menú del *subcatchment* se despliega un submenú en el que se configura el área ocupada por el

TV, el ancho del módulo y el porcentaje de saturación inicial. En el módulo de LID control se ingresan las propiedades del techo verde, correspondientes a las capas de superficie, sustrato y geotextil, presentadas en la descripción de la información experimental.

Análisis de sensibilidad y calibración del modelo

Los análisis de sensibilidad y la calibración se desarrollan como dos procesos paralelos y complementarios, ya que la calibración es un proceso de estimación de valores para las variables de las cuales no se tiene información y en este se analiza el comportamiento de cada variable. En el Gráfico 3 se presentan los rangos, determinados mediante una consulta bibliográfica, en los cuales se analiza la sensibilidad de las variables de magnitud desconocida. La pendiente de conductividad y la cabeza de succión son variables que dependen del tipo de sustrato, dado que no se conoce su composición exacta se optó por relacionar las propiedades hidráulicas con un tipo de suelo de la categoría marga arenarcillosa (*Sandy Clay Loam*) y para este se determinaron los rangos de valores.

Gráfico 3. Rango de valores para las variables consideradas en análisis de sensibilidad

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	RANGO	PROMEDIO
Fracción de vegetación (-)	Volumen ocupado por los tallos y las hojas.	0,10- 0,20	0,15
Rugosidad de la superficie (µm)	Constante n de Manning utilizada para calcular el caudal horizontal del agua drenada a través de la superficie	0,15 – 0,45	0,30
Pendiente de conductividad	Relación existente entre la porosidad de este y el porcentaje de humedad existente	30–60	45

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	RANGO	PROMEDIO
Cabeza de succión (mm)	Valor promedio de la succión capilar del suelo a lo largo del frente de humedecimiento	44,20–1080	562,10
Fracción de vacío (-)	Es el espacio vacío que existe en el volumen total del tapete.	0,50–0,60	0,55
Rugosidad de la Capa (µm)	Esta es la constante n de Manning utilizada para calcular el caudal horizontal del agua drenada.	0,10- 0,40	0,25

Fuente: Storm Water Management Model (US EPA, 2018).

Para realizar el análisis de sensibilidad, la calibración y la validación se tuvieron en cuenta índices de eficiencia usados para modelos hidrológicos, los cuales comparan los datos observados y simulados. Se emplearon cuatro índices, los cuales fueron: *Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe – NSE* (Legates y McCabe, 1999; Tan, et al., 2008); el coeficiente de determinación R^2 (Krause et al., 2005); el Índice de concordancia (d) (Krause, 2005; Willmott, 1984); y Error relativo de volumen – *RVE* (Tan, 2008). Para propósitos de evaluación, se considera que se tiene un buen ajuste para valores de NSE superiores a 0,50, valores de RVE inferiores al 20 % (Mancipe et al., 2014; Tan, 2008), valores de R^2 y d cercanos a 1.

Para realizar el análisis de sensibilidad se ejecutó el modelo cambiando una variable a la vez y fijando las demás en el valor promedio. Inicialmente se emplea el valor máximo y después el valor mínimo del rango (gráfico 3) para cada variable. Posteriormente, se compara el cambio en el NSE y RVE de cada hidrograma generado respecto a la percolación medida experimentalmente durante el 16 de marzo.

Si los valores de NSE y RVE no cambian al modificar la variable, se determina que esta tiene baja sensibilidad, los demás niveles de sensibilidad se asignan de acuerdo con la amplitud del rango de la variable y el valor de los índices obtenidos.

Se definió que las variables de calibración fuesen aquellas que no presentan baja sensibilidad. Para estos parámetros se realiza una calibración manual iniciando por la variable de mayor sensibilidad, modificándola en un rango más amplio de valores al establecido en el gráfico 3. La calibración se da por finalizada al obtener los mejores valores para los índices de eficiencia del modelo que ajustan los datos simulados a los observados.

Validación de resultados

Una vez calibrado el modelo se simula un segundo evento de lluvia con el fin de validar los resultados de la calibración. Una serie de tiempo con la información de precipitación del 24 de febrero de 2015 se configura en SWMM para esta validación. El hidrograma de escorrentía simulada es comparado con el hidrograma de la escorrentía observada mediante los índices de eficiencia presentados en la calibración.

Escenarios de simulación

El comportamiento hidrológico o desempeño del TV se quiere evaluar desde la capacidad del modelo SWMM para reproducir lo observado en campo. Si se reproduce de forma similar este comportamiento, se puede

inferir como se desempeñaría el techo verde frente a condiciones extremas, se consideran dos escenarios:

Eventos de lluvia continuos

Para este escenario se ejecuta una serie de tiempo con la información de precipitación del mes de marzo de 2015. Con el fin de analizar el comportamiento del TV frente a eventos de lluvia consecutivos.

Tormentas de diseño de distinta intensidad y frecuencia

En este escenario se compara el comportamiento del TV durante eventos de lluvia de distinta intensidad-duración-frecuencia (IDF) en dos escenarios de saturación inicial (baja y alta saturación inicial). Para determinar el porcentaje de saturación inicial que mejor representa cada

escenario, se ejecutó el modelo con la serie de tiempo del 16 de marzo de 2015 y se varió la saturación entre 0 % y 80 %. Posteriormente se generaron y ejecutaron tres tormentas de diseño a partir de las curvas IDF en cada escenario de saturación inicial.

Resultados

Análisis de sensibilidad y calibración

El contenido de humedad inicial para el 16 de marzo fue de 24,74 mm (56,49 % de saturación inicial). Los resultados del análisis de sensibilidad arrojaron que solo tres de las seis variables consideradas presentan un nivel de sensibilidad, como se observa en el gráfico 4. En ese mismo gráfico se presentan los resultados de la calibración en la quinta columna.

Gráfico 4. Sensibilidad y calibración de las variables

VARIABLE	Cambio en el índice		Sensibilidad	Valor de calibración
	NSE(-)	RVE(%)		
Fracción de vegetación (-)	0	0	Baja	0,15
Rugosidad de la superficie (μm)	0	0	Baja	0,30
Pendiente de conductividad (-)	0,03	0,54	Media-alta	9
Cabeza de succión (mm)	0	0	Baja	562,10
Fracción de vacío (-)	0,01	-0,06	Media-baja	0,70
Rugosidad de la capa (μm)	0,12	-0,44	Alta	0,10

Fuente: elaborado por los autores.

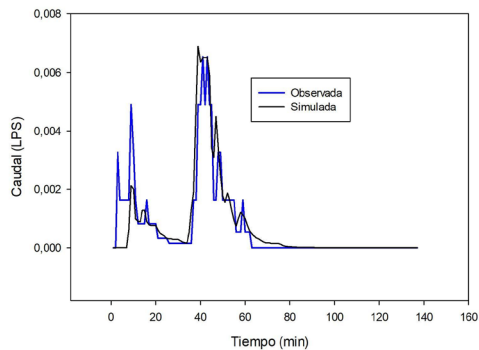
En el análisis de sensibilidad se tiene en cuenta que el rango de variación para la rugosidad de la capa geotextil fue de 0,3 unidades, mientras que la pendiente de conductividad varía en un rango de 30 unidades y la fracción de vacío varía en 0,1 unidades.

En el gráfico 5 se presentan los hidrogramas de escorrentía simulada y observada para

la calibración. La distribución temporal de los picos y su magnitud sugieren que hay un buen ajuste entre ambas curvas, se obtuvieron valores de NSE de 0,78, RVE de -5,76 %, de 0,999 y R^2 de 0,806.

Gráfico 5. Hidrogramas de escorrentía observada y simulada para el 16 de marzo de 2015.

Figura 1. Hidrogramas de escorrentía medida por el CIAA y escorrentía modelada para el 16 de marzo de 2015



Fuente: elaborado por los autores.

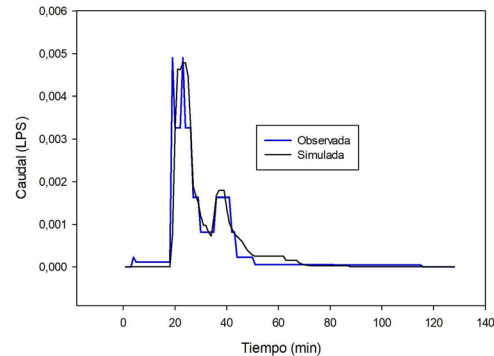
El valor del RVE indica que hay una sobreestimación de la escorrentía bastante baja por parte del modelo. Por lo tanto, el modelo es capaz de reproducir los picos de escorrentía con bastante precisión en esta escala temporal.

Validación de resultados

El porcentaje de saturación inicial para el 24 de febrero fue de 61,01 %. El hidrograma de escorrentía simulado para este evento se presenta en el Gráfico 6, la distribución temporal de los picos y su magnitud indican un buen ajuste. Los índices de eficiencia calculados para este hidrograma fueron de 0,803 para el NSE, 0,830 para el R^2 , 3,05 % para el RVE y 0,999 para el índice de concordancia. Estos resultados indican que, con los parámetros calibrados, es posible reproducir la escorrentía percolada con bastante precisión incluso para una tormenta en un mes posterior.

Gráfico 6. Hidrogramas de escorrentía observada y simulada para el 24 de febrero del 2015.

Figura 2. Escorrentía observada y simulada para el 24 de febrero de 2015



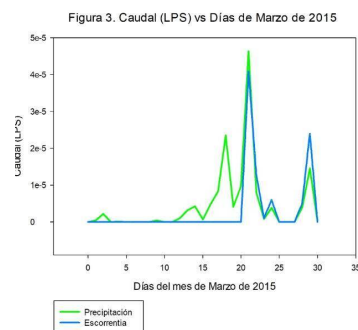
Fuente: elaborada por los autores.

Simulación de eventos de lluvia

Eventos de lluvia continuos.

Al simular información de precipitación para el mes de marzo de 2015 se obtuvo el hidrograma de escorrentía presentado en el gráfico 7. En esta figura se observa que ocurre una atenuación de los eventos de lluvia que ocurren a principios del mes, luego de un periodo sin precipitación se observa que el techo sigue reteniendo eventos de lluvia de baja intensidad. Sin embargo, después del 20 de marzo ocurre un evento de lluvia de gran intensidad que sí genera escorrentía, a partir de allí los eventos subsecuentes también generan escorrentía a pesar de ser de baja intensidad.

Gráfico 7. Hidrograma de precipitación y escorrentía para el mes de marzo de 2015.



Fuente: elaborado por los autores.

Tormentas de diseño de distinta intensidad y frecuencia

En el gráfico 8 se presentan los resultados del análisis de la escorrentía respecto al

porcentaje de saturación inicial para el evento de lluvia usado en la calibración.

Gráfico 8. Valores de escorrentía para distintos porcentajes de saturación inicial

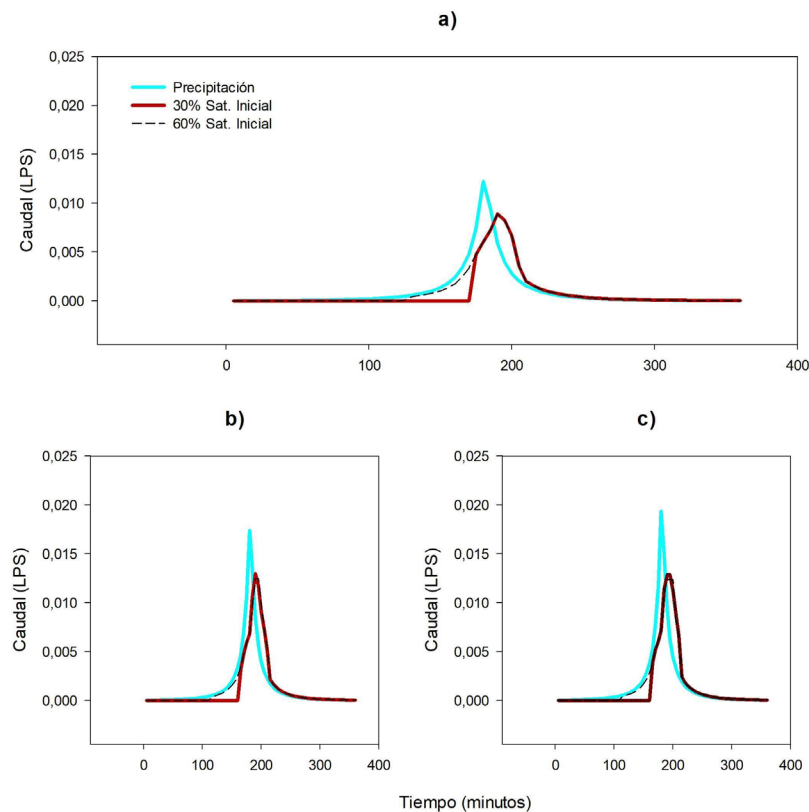
Aspecto	0 %	10 %	30 %	50 %	70 %	80 %
Almacenamiento inicial (mm)	9,6	12,28	17,64	23,00	28,36	31,04
Escorrentía (mm)	0	1,46	6,53	11,62	16,70	19,24

Fuente: elaborado por los autores.

A partir de la tabla anterior se definió que los escenarios de alta y baja saturación inicial fuesen de 30 % y 60 % respectivamente. El primer porcentaje es suficientemente bajo como para generar escorrentía y el segundo porcentaje es tan alto que la cantidad de humedad en el sustrato es capaz de generar escorrentía. Los hidrogramas de escorrentía

generados para las tormentas de diseño con 5, 50 y 100 años periodo de retorno se presentan en el gráfico 9.

Gráfico 9. Hidrogramas de precipitación y escorrentía simuladas para tormentas de a) 5 años, b) 50 años y c) 100 años de periodo de retorno.



Fuente: elaborado por los autores.

Se observa que el porcentaje de saturación inicial únicamente influye en el tiempo que tarda en generarse la escorrentía y en las tres gráficas se observa cierta atenuación de los picos de precipitación. Los valores de retención y escorrentía generadas para

las tormentas de diseño se presentan en el gráfico 10.

Gráfico 10. Valores de Escorrentía (E) y retención (R) para dos escenarios de saturación inicial y tres periodos de retorno.

Periodo Retorno	Precipitación (mm)	SATURACIÓN INICIAL			
		30 %		60 %	
		E (mm)	R (%)	E (mm)	R (%)
5 años	44,54	34,63	22,26	42,26	5,13
50 años	63,42	55,16	13,02	62,15	2,01
100 años	70,54	61,34	13,04	68,35	3,11

Fuente: elaborado por los autores.

Discusión

Es necesario aclarar que, aunque sólo se cuenta con dos eventos de lluvia para realizar la calibración y validación del modelo, existen investigaciones donde se demuestra que SWMM es capaz de representar la retención anual de techos verdes extensivos con una diferencia entre escorrentía modelada y medida inferior al 1% incluso sin ser calibrado previamente (Peng y Stovin, 2017) y que mediante el módulo de LID control se pueden simular LID establecidos en un área en la que ocurren sucesos de almacenamiento, infiltración, evaporación y precipitación, al calibrar y validar correctamente el modelo (Palla y Gnecco, 2015). Por otro lado, es importante indicar que la condición antecedente de humedad del sustrato es la variable afectada mayormente durante una calibración/validación al usar eventos de lluvia individuales (Mancipe et al. 2014), por lo cual, evaluar un evento de lluvia sería suficiente para determinar si el modelo es capaz de calcular esta variable de forma acertada.

La fracción de vacío, los porcentajes de saturación, la rugosidad y la capacidad de campo son los parámetros del sustrato que deben ser calibrados principalmente dentro de SWMM. (Versini, 2015). Los índices de eficiencia determinados para la calibración y la validación muestran que SWMM reproduce los valores experimentales con un buen ajuste, incluso al calibrarlo con un solo evento de lluvia. En cuanto a la rugosidad de la capa, se encontró que cualquier valor superior a 0,10 elimina completamente los picos de escorrentía. Para la pendiente de conductividad se obtuvo un mejor ajuste con un valor por debajo del rango encontrado en la literatura, esto es aceptable ya que el tipo de sustrato no se ajusta perfectamente a un tipo de suelo natural, así mismo la literatura menciona que cuanto más baja la pendiente y la intensidad de la lluvia mayor será la retención tal como se observó en los ajustes (Czmiel, 2010). La escorrentía se mantiene constante al usar valores superiores a 0,70 en la fracción de vacío, esto significa que el sustrato alcanza un punto en el cual el geotextil, debido a la cantidad de vacíos que presenta, deja de ser una barrera que

impide el paso de la escorrentía. Se considera importante que en futuras investigaciones y en montajes experimentales se midan estos parámetros.

Respecto a la simulación del mes de marzo, la atenuación de algunos eventos de menor intensidad se debe a que el TV se satura de humedad luego de los eventos de lluvia y por ende pierde su capacidad de retención, esta capacidad sólo se recupera mediante la evapotranspiración que ocurre en periodos donde no ocurre precipitación (Palla, 2015). Cipolla et al. 2016 señalan que la recuperación de la capacidad de retención del TV, necesaria para disminuir la percolación, se ve influenciada por la presencia de vegetación, aire y radiación solar directa, parámetros que son usados para calcular la ET. Adicionalmente, en Colombia ocurren dos periodos de invierno, durante los meses de marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre (Molina *et al.*, 2011). Durante estos periodos, en Bogotá, la precipitación media oscila entre 69mm en la localidad de Bosa y 142 mm en el norte de la Ciudad de Bogotá (Ideam, 2007), una profundidad mucho mayor que la precipitación correspondiente a una tormenta de 100 años de periodo retorno. Las altas precipitaciones favorecen la saturación del suelo y disminuyen la capacidad de retención de los TV, lo cual puede limitar su funcionamiento en ciudades intertropicales. Del mismo modo, pequeños eventos de lluvia <10 mm pueden ser retenidos completamente en los techos verdes (Simmons *et al.*, 2008), en eventos de mayor magnitud se presentaría lo mencionado anteriormente. Finalmente, las tormentas de diseño ejecutadas presentan altas profundidades de precipitación (entre 44 mm y 70 mm), en especial los eventos de lluvia de 50 y 100 años periodos retorno.

Sin embargo, se observa que para ninguno de estos escenarios el modelo registra un desbordamiento. Esto implica que el módulo de TV presenta una buena capacidad de drenaje. El porcentaje de retención disminuye en un 17,13 % al aumentar de 30 % a 60 % en la tormenta de 5 años de periodo retorno, mientras que para la tormenta de 100 años de periodo retorno la retención disminuye un 9,93 %.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó que el software SWMM 5.1 permite simular la escorrentía generada por un TV durante eventos de lluvia individuales, por lo tanto, este modelo se puede convertir en una herramienta útil para realizar análisis regionales que busquen generar la ubicación eficiente de TV con el fin de reducir la escorrentía urbana.

Se determinó que, por su nivel de sensibilidad, las variables de calibración fueran la rugosidad de la capa geotextil, la pendiente de conductividad y la fracción de vacío del geotextil. Se recomienda que en futuros montajes experimentales estas variables sean medidas en campo, con el fin de tener mayor certeza en la modelación.

Debido a la relevancia que tuvo el porcentaje de saturación inicial en la retención y almacenamiento del TV, tanto para eventos individuales como continuos, se sugiere que este sea medido en campo en futuras investigaciones o que sea estimado mediante un balance hídrico, puesto que se obtuvieron buenos resultados en la modelación.

De acuerdo con los escenarios simulados, se encontró que el porcentaje de saturación

inicial influye directamente en el tiempo de generación de la escorrentía y en el almacenamiento del TV. Además, las características del sustrato lo dotan de una buena capacidad de drenaje, por lo cual no se desborda ante eventos de lluvia de gran intensidad.

Para países intertropicales como Colombia, donde los periodos de lluvia incrementan la saturación del suelo, es posible que los TV no sean tan efectivos en la reducción de la escorrentía urbana superficial.

Agradecimientos

Manifestamos nuestros sinceros agradecimientos al Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) de la Universidad de los Andes, en especial al ingeniero Juan Pablo Rodríguez, por permitirnos acceder a los techos verdes y por suministrarnos toda la información necesaria para desarrollar esta investigación. A la ingeniera Paola Aldana por su apoyo y dedicación para el desarrollo de este proyecto. Finalmente, a La Universidad de la Salle por su apoyo al semillero de Investigación SIGMMAqua.

Referencias

Alfredo, K., Montalto, F. and Goldstein, A. (2010). Observed and Modeled Performances of Prototype Green Roof Test Plots Subjected to Simulated Low- and High-Intensity Precipitations in a Laboratory Experiment. *Journal of Hydrologic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000135)

Bonoli, A., Conte, A., Maglionico, M., Stojkov, I. (2013). Green roofs for sustainable water management in urban areas. *Environmental Engineering and Management Journal*.

Chow, V. T., Maidment, D. R. and Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. *Hidrología Aplicada*. McGRAW HILL

Cipolla, S. S., Maglionico, M., Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modeling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.009>

Czemieli Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>

Ferrans, P., Rey, C. V., Pérez, G., Rodríguez, J. P., Díaz-Granados, M. (2018). Effect of green roof configuration and hydrological variables on runoffwater quantity and quality. *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w10070960>

G. B. Toskano Hurtado, (2005) “El proceso de análisis jerárquico (ahp) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores” .

Ideam. (2007). Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21135/CARACTERIZACION+CLIMATICA+BOGOTA.pdf/d7e42ed8-a6ef-4a62-b38f-f36f58db29aa>

Ingetec and Empresa de Acueducto de Bogotá. (2014). Caracterización de tormentas y actualizaciones de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia. Bogotá D.C.

- Jato-Espino, D., Charlesworth, S. M., Bayon, J. R. and Warwick, F. (2016). Rainfall-runoff simulations to assess the potential of suds for mitigating flooding in highly urbanized catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010149>
- Krause, P., Boyle, D. P. and Båse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Legates, D. R. and McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- Mancipe, N. A., Buchberger, S. G., Suidan, M. T. and Lu, T. (2014). Calibration of Rainfall-Runoff Model in Urban Watersheds for Stormwater Management Assessment. *Journal of Water Resources Planning and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000382)
- Molina, M., Gutiérrez, L. and Salazar, J. (2011). Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible. *Ambiente, Secretaria Distrital de Medio*.
- Oviedo, N., Torres, A. (2014). Hydric attenuation and hydrological benefits for implementing productive green roof in Soacha, Colombia. *Ingeniería y Universidad*. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-2.hahb>
- Palla, A., Gnecco, I. (2015). *Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale*. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>
- Peng, Z. and Stovin, V. (2017). Independent Validation of the SWMM Green Roof Module. *Journal of Hydrologic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001558](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001558).
- Pérez, G. (2015). Experiencias en el monitoreo continuo de techos verdes modulares extensivos. Tesis (Maestría en Ingeniería Civil). Bogotá, Universidad de Los Andes. Retrieved from <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13184>
- Simmons, M. T., Gardiner, B., Windhager, S. and Tinsley, J. (2008). Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>
- Tabares, J. Gallo, L. M. y Mancipe N.A. (2018). Selección de un modelo matemático mediante la metodología ahp para modelar techos verdes en Colombia (en proceso de publicación). *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo para nuestro próximo Volumen 18 N° 2*
- Tan, S. B., Chua, L. H., Shuy, E. B.; Lo A. M.; E. Y.-M. and Lim, L. W. (2008). Performances of Rainfall-Runoff Models Calibrated over Single and Continuous Storm Flow Events. *Journal of Hydrologic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:7\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(597))
- Universidad Jorge Tadeo Lozano. (2018). ¿Qué es modelado y simulación? Bogotá. Retrieved December 5, 2018,

from <https://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>

US EPA, O. (2018). Storm Water Management Model (SWMM). Retrieved from <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Versini, P. A., Ramier, D., Berthier, E. and de Gouvello, B. (2015). Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.020>

Willmott, C. J. (1984). On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography. In *Spatial Statistics and Models*. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3048-8_23