



ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN MEDIOS URBANOS UTILIZANDO TECHOS VERDES

RAINWATER STORAGE IN URBAN ENVIRONMENTS USING GREEN ROOFS

Nelson Andrés López Machado¹ , Christian Gonzalo Domínguez
Gonzalez² , Wilmer Barreto³ , Néstor Méndez⁴ , Leonardo José López
Machado¹ , María Gabriela Soria Pugo² , Ronnie Xavier Lizano Acevedo⁵  y
Vanessa Viviana Montesinos Machado⁴ 

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile, Av Libertador Bernardo O'Higgins 340, Santiago, Región Metropolitana, Chile.

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana. Av. Morán Valverde s/n y Rumichaca. Campus Sur. Quito, Ecuador.

³ Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica de Temuco. Av Manuel Montt 56, Temuco, Araucanía, Santiago, Chile.

⁴ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Av. Carrera 19 entre calles 8 y 9, Barquisimeto 3001, Lara, Venezuela.

⁵ Carrera de Ingeniería Ambiental, Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales GRICAM, Universidad Politécnica Salesiana. Av. Morán Valverde y Rumichaca, Quito.

*Autor para correspondencia: nalopez4@uc.cl

Manuscrito recibido el 9 de julio de 2019. Aceptado, tras revisión, el 4 de mayo de 2020. Publicado el 1 de septiembre de 2020.

Resumen

El siguiente artículo de investigación trata sobre el uso de techos verdes como almacenadores de agua de lluvia en su matriz de suelo. La metodología es analítica basada en modelos matemáticos, en donde se compara la escorrentía producida en un urbanismo con condiciones actuales de techos ordinarios con materiales cerámicos o bituminosos como escenario original, contra otro donde se usan techos verdes. La zona de estudio se ubica en el municipio Palavecino del estado Lara en Venezuela, en la zona de inundación de la Quebrada Tabure. En esta investigación se empleó la comparación cuantitativa de los hidrogramas de escorrentía directa de los escenarios planteados, obteniendo como resultado principal, la reducción de la escorrentía. Un punto interesante de esta investigación fue la incorporación del tránsito de hidrogramas en los techos, reduciendo aún más el caudal pico y el tiempo al pico de los hidrogramas generados.

Palabras clave: Techos verdes, escorrentía, hidrogramas, caudal pico, almacenamiento de agua de lluvia, tránsito

de hidrogramas.

Abstract

This article discusses the use of green roofs as rainfall water storage in its soil matrix. The methodology is analytical based on mathematical models, where runoff produced in an urban area is compared with current conditions of ordinary roofs with ceramic or bituminous materials as the original scenario, against another where green roofs are used. The study area is located in the Palavecino municipality of Lara state in Venezuela, in the flood zone of Quebrada Tabure. In this research, a quantitative comparison of the direct runoff hydrographs of the proposed scenarios was used, obtaining as a main result the reduction of runoff between 60% and 80% according to the period of return. An interesting point of this research was the incorporation of the routing of hydrographs on the roofs, reducing even more the peak flow over 90%, and delaying the peak time of the generated hydrographs between 10 and 12 minutes while the total duration of the hydrographs increase more than three times.

Keywords: Green roofs, runoff, hydrographs, peak flow, rainwater storage, routing hydrographs.

Forma sugerida de citar: López, N., Domínguez, C., Barreto, W., Méndez, N., López, L., Soria, M., Lizano, R. y Montesinos, V. (2020). Almacenamiento de agua de lluvia en medios urbanos utilizando techos verdes. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 32(2):54-71. <http://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.05>.

IDs Orcid:

Nelson López: <http://orcid.org/0000-0002-3111-7952>
Christian Domínguez: <http://orcid.org/0000-0003-2971-7163>
Wilmer Barreto: <http://orcid.org/0000-0002-1861-0742>
Néstor Méndez: <http://orcid.org/0000-0003-1300-5049>
Leonardo López: <http://orcid.org/0000-0002-1562-0662>
María Gabriela Soria: <http://orcid.org/0000-0001-9045-0870>
Ronnie Lizano: <http://orcid.org/0000-0002-9490-8882>
Vanessa Montesinos: <http://orcid.org/0000-0002-5355-5099>

1 Introducción

El urbanismo tiene un impacto en el cambio de uso del suelo y en la hidrología local, acompañado de otros efectos negativos. El crecimiento continuo de las ciudades ha aumentado la proporción de áreas impermeables. La impermeabilización progresiva e incontrolada de superficies altera el ciclo hidrológico (Figura 1), disminuyendo la respuesta de una cuenca a un evento de lluvia, aumentando el volumen de agua drenada y, por lo tanto, disminuyendo

la recarga a los acuíferos. Además, el crecimiento de ciudades sin planificación urbana puede ocasionar la alteración de los cursos naturales, generando la necesidad de construir canales artificiales que eventualmente conducen a peores problemas en términos de drenaje urbano, como inundaciones, colapso de drenajes longitudinales y transversales y retrasos durante las horas de trabajo de los habitantes, además de los problemas sociales causados por las razones antes mencionadas.



Figura 1. Efecto de la construcción en el ciclo hidrológico.

El agua tiene un ciclo que mantiene un equilibrio entre la evaporación, escorrentía, precipitación, infiltración, evapotranspiración, entre otros, que se puede traducir según Chow, Maidment y Ways (1994) como se muestra en la Ecuación 1. Donde P es el total de la densidad de la precipitación, P_e es la densidad de la precipitación que causa la escorrentía, I_a es la abstracción inicial, F_a es la cantidad de agua retenida en la cuenca y E es la evaporación relacionada con la vegetación o las propiedades de la cuenca.

$$P = P_e + I_a + F_a + E \quad (1)$$

En estos procesos, los canales naturales toman ciertas dimensiones para hacer transitar la escorrentía generada, un proceso que es naturalmente lento dependiendo de las características de la cuenca, suelo, vegetación, entre otros. En el caso de las zonas urbanas, el proceso de infiltración se reduce, por lo que la escorrentía generada es mucho mayor y los canales naturales no son capaces de hacer circular el nuevo flujo máximo. Otro problema ge-

nerado por la construcción sin reposicionamiento de zonas verdes es el efecto isla de calor urbana, que se genera en zonas que son significativamente más cálidas que las zonas rurales cercanas, ya que la producción de oxígeno disminuye y la de dióxido de carbono aumenta (Arabi y col., 2015). Además es necesario tener en cuenta los eventos intensos de lluvia incrementados por el cambio climático (Olivares, 2018; Serrano y col., 2012; Serrano, Ruíz y Bersosa, 2017; Ilbay-Yupa, Zubieta y Lavado-Casimiro, 2019). Igualmente, la cerámica y los materiales bituminosos retienen mucho más calor que el suelo con vegetación, contribuyendo también a este efecto. Según EPA (2018), los techos verdes se pueden definir como un techo con vegetación. Los componentes de las cubiertas verdes pueden variar, pero básicamente consisten en vegetación, sustrato de crecimiento, capa de filtro, capa de drenaje, capa de impermeabilización y barrera de raíz (Minke, 2017; Vijayaraghavan, 2016).

Según Berardi, GhaffarianHoseini y Ghaffarian-

Hoseini (2014) y Minke (2017), los techos verdes se pueden clasificar en dos tipos basados en el espesor del sustrato de crecimiento; (i) techos verdes extensivos que generalmente tienen un espesor de sustrato de crecimiento por debajo de 20 cm, un peso máximo de 150 kg/m^2 y no necesitan riego porque su vegetación es común, como musgo y hierba; y, ii) techos verdes intensivos, que tienen un espesor de sustrato de crecimiento superior a 20 cm generando un peso total superior a 300 kg/m^2 y necesitan drenaje y riego debido a la vegetación utilizada. Los techos verdes tienen múltiples aplicaciones, y una de ellas es retener y almacenar el agua de lluvia, disminuyendo la escorrentía, y por lo tanto el impacto del efecto isla de calor (EPA, 2018), y la deforestación en entornos urbanos, disminuyendo el impacto negativo en la fauna local.

Otro beneficio es que los techos verdes podrían ser una solución como alternativa para recuperar los espacios verdes en zonas urbanizadas (Berardi, GhaffarianHoseini y GhaffarianHoseini, 2014). Según BCIT (2018), Minke (2017), Berardi, GhaffarianHoseini y GhaffarianHoseini (2014) y Technology (2018) los techos verdes tienen muchos beneficios, como por ejemplo ampliar la vida útil del techo hasta por 60 años; recuperar los espacios muertos y transformarlos en espacios de jardín; reducir la escorrentía de aguas pluviales y el efecto "isla de calor" (EPA, 2018); disminuir el smog, el ruido, la demanda de energía y el impacto del monóxido de carbono y mejorar la calidad del aire; evitar el desbordamiento combinado del alcantarillado; eliminar la contaminación por nitrógeno de la lluvia; neutralizar el efecto de lluvia ácida; restaurar el hábitat de la vida silvestre; mejorar la calidad del aire urbano, entre otros.

Los techos verdes son una parte importante en los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), que tratan de recuperar el ciclo natural del agua en la ciudad. Los SUDS se encuentran dentro de las estrategias utilizadas para mejorar el funcionamiento y la sostenibilidad del desarrollo urbano de las ciudades. Los techos verdes desempeñan un buen papel en las aplicaciones SUDS debido a su capacidad para disminuir la generación de escorrentía de aguas pluviales en términos de reducción de escorrentía, tiempo pico y retraso en el tiempo de concentración (Fioretti y col., 2010). El comportamiento del hidrógrafo se modifica significativamente cuan-

do el flujo máximo se reduce sólo por el cambio en el uso del techo (de techo convencional al verde), y es aún más notable cuando se hace un tránsito para cada techo utilizando estructuras similares a vertederos adicionales a los techos verdes.

El acceso a los espacios verdes en América Latina es muy limitado, especialmente en las zonas periféricas debido a la idea de planificación que está al servicio de zonas con poder socioeconómico (Escobedo y col., 2006; Reyes y Figueroa, 2010; Romero y Vásquez, 2005; Vásquez y Romero, 2008), en este contexto es necesario luchar por la justicia ambiental y espacial que permita a todos los ciudadanos reclamar un acceso urbano verde. Actualmente, la recomendación de la OMS es contar con $9 \text{ m}^2/\text{persona}$ de espacio verde en una ciudad; sin embargo, hay muchas áreas con menos de $1 \text{ m}^2/\text{persona}$. Este análisis lleva a asumir que la construcción espacial ha sido diseñada con la intención de excluir muchas zonas, y las estrategias de justicia ambiental y espacial pueden ayudar a recuperar los espacios urbanos para la silvicultura urbana y periurbana, que se pueden complementar con los techos verdes. Todos estos esfuerzos pueden mejorar a los ecosistemas urbanos y a la calidad de vida de las personas.

Los techos verdes son una de las mejores herramientas para la gestión de aguas pluviales en las zonas urbanas al disminuir las posibilidades de inundación repentina, además, la vegetación en la parte superior de los tejados aumenta la evapotranspiración. Las plantas en crecimiento absorben una cantidad de agua de lluvia, disminuyendo el flujo máximo, la hora pico y la escorrentía. El techo verde tiene la capacidad de capturar las peligrosas partículas de polvo fino del aire que podrían ayudar a mejorar la comodidad de la población en áreas urbanas muy concurridas (Shafique y Rafiq, 2018). Los techos verdes ayudan a reducir la contaminación del aire de dos maneras diferentes. En primer lugar, capturan las partículas finas del polvo o los llamados contaminantes del aire a través de las estomas. En segundo lugar, los techos verdes disminuyen la temperatura superficial que ayuda a la quema de fósiles para satisfacer los requisitos energéticos (Yang, Yu y Gong, 2008).

Según Huang (1994), 1000 m^2 de techos verdes son capaces de eliminar desde 160 kg a 220 kg al

año de polvo, lo que resulta en la mejora del medio ambiente. Se eliminaron un total de 1675 kg de contaminantes del aire en sólo un año en 19,8 hectáreas de cubiertas verdes con un O_3 , que representa el 52% del total, el 27% del NO_2 , el 14% de PM_{10} y el 7% del SO_2 . El nivel más alto de reducción de la contaminación atmosférica se produjo en mayo y la cantidad más baja en febrero. La reducción anual por hectárea de techo verde fue de unos 85 kg/ha/año según Yang, Yu y Gong (2008). El autor mencionó que los techos verdes podrían servir como estrategias complementarias en el urbanismo, siendo la estrategia principal la silvicultura y la posibilidad de crear lugares públicos, tales como parques. Además, Connelly y Hodgson (2013) demostraron que los techos verdes son capaces de reducir la frecuencia de ruido en 10 y 20 dB, y también tienen la capacidad de absorber las ondas sonoras y reducir el nivel de sonido en comparación con los techos regulares.

Los techos verdes y las paredes verdes no son las únicas técnicas para la reconciliación con la ecología urbana, también lo son los jardines privados, los parques públicos y la plantación de árboles urbanos (Francis y Lorimer, 2011). Según MacIvor y Lundholm (2011), se recolectaron una variedad de especies de insectos comunes y poco comunes de algunos techos verdes, apoyando la idea de que estos hábitats ayudan a mantener y restaurar la biodiversidad en las ciudades.

2 Bases teóricas

El objetivo principal es determinar el almacenamiento de agua de lluvia en techos verdes utilizando hidrógrafos, por lo tanto, es necesario un método correcto para calcular la escorrentía y lograr el objetivo. Existen varios métodos para determinar los flujos máximos dependiendo de la zona de la cuenca y de los datos disponibles, como el método racional o el método de hidrografía unitaria sin dimensiones (Chow, Maidment y Ways, 1994). El método racional se recomienda para las cuencas cuyas áreas son inferiores a 200 hectáreas, y sus resultados se limitan al valor de flujo máximo, por lo tanto, no es posible obtener la variación de la escorrentía a través del tiempo.

El método de hidrógrafo unitario sin dimensio-

nes permite determinar con un hidrógrafo el comportamiento de la descarga a través del tiempo. Aunque, el método racional podría aplicarse en esta investigación (la superficie del techo es inferior a 200 hectáreas) se utilizó la hidrografía unitaria sin dimensiones para estimar el volumen real de agua de lluvia. En este método, los hidrógrafos se calculan sobre la base de un hidrógrafo unitario sin dimensiones que se obtiene a partir de la observación de hidrógrafos reales. Se necesitan la estimación de la precipitación y la infiltración para determinar el hidrógrafo de una cuenca y los eventos de precipitación máxima (que causan inundaciones. De igual forma, se pueden utilizar varios métodos para estimar la infiltración como Horton, Green-Ampt, y el número de curva propuesto por el Servicio de Conservación del Suelo de los Estados Unidos de América (SCS) (Viola, Hellies y Deidda, 2017).

2.1 Densidad total de la precipitación

Generalmente, la precipitación no tiene una intensidad o comportamiento lineal a lo largo del tiempo, sino que es variado. La precipitación se puede expresar a lo largo del tiempo con un hietograma de precipitación, que distribuye la densidad total del agua de lluvia en varios intervalos de tiempo con una distribución constante o variable. El Servicio de Conservación del Suelo (SCS) propone un método para determinar el hietograma de precipitación, utilizando el hietograma sin dimensiones (Chow, Maidment y Ways, 1994). El hietograma de precipitación necesita estimar la densidad total de lluvia que produce escorrentía, y para ello es necesario construir las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF). De acuerdo con el tiempo de concentración de la cuenca (tiempo en el que una gota de agua toma para recorrer la distancia desde el punto más lejano de una cuenca hasta su producción) y la intensidad de lluvia dado un cierto período de retorno, la densidad total del agua de lluvia podría determinarse usando la Ecuación 2.

$$P = I * T \quad (2)$$

Donde I es la intensidad de la lluvia (mm/h). P es la densidad de la lluvia (mm). T es la duración de la lluvia (hora). La intensidad se estima con las curvas IDF, que normalmente son conocidas según la región de estudio. El tiempo de concentración se puede calcular utilizando la ecuación de Kirpich (Ecuación 3). Con T_c es el tiempo de concentración de la

cuenca (minutos). L es la longitud del canal (ft, m). S es la pendiente media del canal (ft/ft, m/m).

$$T_c = 0,0078 * \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (3)$$

2.2 Distribución de la densidad total de la precipitación

Para distribuir la densidad total de las precipitaciones, se utilizó el método de bloque alterno (Chow, Maidment y Ways, 1994). En este método, el tiempo de concentración se divide en sub-intervalos (ΔT) y la intensidad acumulada de la precipitación se calcula utilizando una curva IDF para un período seleccionado de retorno. Para cada sub-intervalo de tiempo, se calcula la intensidad parcial de la lluvia y se determina la densidad de la precipitación (P) utilizando la ecuación 1. Se necesita reorganizar a P , con el fin de trazar en un gráfico (P en el eje vertical vs ΔT en el eje horizontal), el valor más alto de P en el centro del eje horizontal, y luego el segundo valor más alto de P justo en el lado derecho del valor más alto de P , y el tercer valor más alto de P a la izquierda del valor más alto de P , y así sucesivamente (Figura 2).

2.3 Infiltración

La infiltración se calculó utilizando el método de número de curva (Chow, Maidment y Ways, 1994), dependiendo del tipo de suelo, las abstracciones iniciales y la humedad antecedente. La infiltración se puede calcular utilizando la Ecuación 4 (Chow, Maidment y Ways, 1994) con CN el número de curva según NRCS (1973). En esta investigación, se utilizó CN II debido a la zona de estudio que presenta precipitaciones regulares a lo largo del año. S es la capacidad total de retención de agua del suelo (mm). La infiltración en los techos verdes depende del espesor de la matriz del suelo (Sims y col., 2016; Liu y col., 2019).

$$S = \frac{2540}{CN} - 25,4 \quad (4)$$

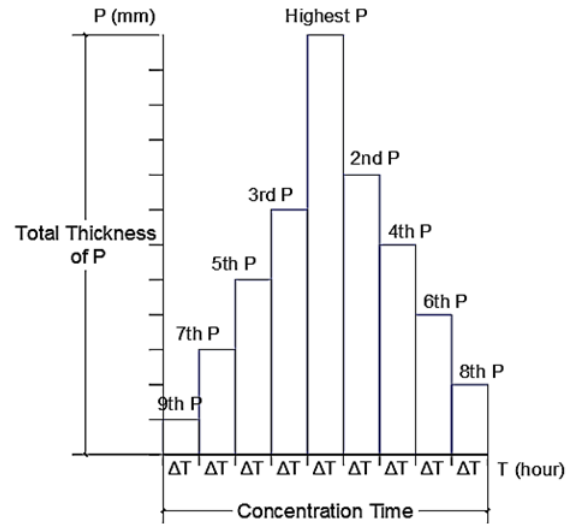


Figura 2. Hietograma de precipitación.

2.4 Estimación de escorrentía del hidrógrafo

La densidad parcial de la escorrentía se calcula utilizando la Ecuación 5, que representa la porción de agua de lluvia que el suelo no puede absorber. Donde S es la capacidad total de retención del agua del suelo (mm). P es la escorrentía del agua de lluvia (mm). Q es la porción del agua de lluvia que el suelo no puede absorber (mm). Si la expresión $P - 0,2 * S$ es menor a cero, entonces no hay escorrentía, porque la infiltración es mayor que el agua de lluvia en mm. La constante sin dimensiones 0,2 se conoce como la abstracción inicial, y representa la porción estimada del suelo que retiene efectivamente el agua. Una vez calculado el valor de Q para cada valor de P , se puede obtener el hidrógrafo para la cuenca de estudio aplicando el hidrógrafo unitario, en la que el eje vertical representa la escorrentía sin dimensiones y el eje horizontal representa el tiempo sin dimensiones para la escorrentía.

$$Q = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{(P + 0,8 * S)} \quad (5)$$

Para construir el hidrógrafo unitario debe verse afectado por el tiempo de concentración y el espesor total de la escorrentía. Para transformar el hidrógrafo unitario en el real, el flujo máximo para cada espesor de escorrentía debe calcularse utilizando la Ecuación 6. Donde qp es el flujo máximo (m^3/s), A es el área de la cuenca (km^2), Q es la densidad de la

lluvia (mm) y T_p es el tiempo pico estimado en 60% del tiempo de concentración.

$$qp = 0,208 * \frac{(A * Q)}{T_p} \quad (6)$$

El tiempo de concentración es el tiempo en donde las precipitaciones alcanzan el punto de estudio (Chow, Maidment y Ways, 1994). Para el drenaje urbano y las cuencas pequeñas, la Ecuación 3 ofrece tiempos de concentración cortos. Sin embargo, se sabe que la escorrentía comienza después de que la superficie está saturada, lo que podría tardar varios minutos e incluso más que el tiempo de concentración calculado. Además, la relación entre la intensidad de las precipitaciones y la duración se evalúa teniendo en cuenta el tiempo de concentración de la superficie de drenaje. Tal relación muestra que la intensidad de la lluvia tiende a ir hacia el infinito con una duración de lluvia corta; por lo tanto, el diseño con estas intensidades podría ser poco realista. Para evitar estos problemas, se ha considerado un tiempo de concentración de 10 minutos si el valor obtenido por la Ecuación 3 es demasiado corto. Esta se utiliza comúnmente en manuales de drenaje para pequeñas cuencas y áreas urbanas (Ramke, 2018; TxDOT, 2019).

2.5 Hidrógrafos de enrutamiento

Los hidrógrafos de enrutamiento se utilizan para simular correctamente la capacidad de almacenamiento de agua del techo verde y su efecto en la generación de escorrentía. Con el fin de disminuir la magnitud del flujo máximo y extender la duración de los hidrógrafos, se debe aplicar un enrutamiento de los mismos. El tránsito de hidrógrafos es un procedimiento que permite calcular un hidrógrafo atenuado de salida con un hidrógrafo de entrada. Cuando se utiliza un hidrógrafo de enrutamiento, el tiempo de flujo máximo se retrasa y se reduce su valor. En algunos casos, si el hidrógrafo de entrada se enruta con posibilidad de almacenamiento, el hidrógrafo de salida tendría un volumen menor que el hidrógrafo de entrada.

El método más común para enrutar un hidrógrafo es el método Runge-Kutta de 3er orden (Chow, Maidment y Ways, 1994), basado en la ecuación de continuidad que se muestra en la Ecuación 7 (Fenton, 2009). Donde dS es el volumen de agua almace-

nado. I_t es el flujo de entrada durante un instante de tiempo, Q_H es el flujo de salida durante un instante de tiempo en una altura de la reserva (en este caso, los vertederos en los techos verdes). El término dS podría expresarse como el cambio de volumen debido al aumento en la reserva, como se muestra en la Ecuación 8.

$$\frac{dS}{dt} = I_t - Q_H \quad (7)$$

$$dS = A(H)dH \quad (8)$$

Donde $A(H)$ es el área de la elevación H , por lo tanto, la Ecuación 6 podría reescribirse como se muestra en la Ecuación 9.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I_t - Q_H}{A(H)} \quad (9)$$

La solución para la Ecuación 8 consiste en la subdivisión de la pendiente $\frac{dH}{dt}$ por tres incrementos para transformar la ecuación diferencial en $\frac{\Delta H}{\Delta t}$, donde ΔH se calcula como se muestra en la Ecuación 10.

$$\Delta H = \frac{\Delta H_2}{4} + \frac{3\Delta H_3}{4} \quad (10)$$

Donde ΔH_1 y ΔH_3 se calculan siguiendo las ecuaciones de la 11 a la 13.

$$\Delta H_1 = \frac{I(t) - Q(H)}{A(H)} \Delta t \quad (11)$$

$$\Delta H_2 = \frac{I\left(t + \frac{\Delta t}{3}\right) - Q\left(H + \frac{\Delta H_1}{3}\right)}{A\left(H + \frac{\Delta H_1}{3}\right)} \Delta t \quad (12)$$

$$\Delta H_3 = \frac{I\left(t + \frac{2\Delta t}{3}\right) - Q\left(H + \frac{2\Delta H_2}{3}\right)}{A\left(H + \frac{2\Delta H_2}{3}\right)} \Delta t \quad (13)$$

Los valores de $Q(H)$ se obtienen mediante la construcción de la curva de "altura-superficie-capacidad", en la que la altura total de la reserva (la matriz del suelo en este caso) se subdivide en intervalos, y el volumen para cada intervalo se calcula utilizando la Ecuación 14. Los valores de $Q(H)$ se

obtienen mediante una interpolación, una vez calculada la altura respectiva para un valor del flujo de entrada (Chow, Maidment y Ways, 1994).

$$V_H = \Delta_H * A \quad (14)$$

3 Metodología

La metodología aplicada para calcular la estimación del almacenamiento de agua de lluvia utilizando techos verdes fue la comparación directa entre la escorrentía producida por un techo ordinario y la escorrentía producida por un techo verde. Se obtuvo la información necesaria para generar los hidrógrafos utilizando un software de licencia gratuita, Quantum Gis (QGIS, 2014), con el fin de crear un mosaico para cubrir el área cerca de la "Quebrada Tabure" en el municipio de Palavecino del estado Lara, Venezuela, utilizando fotografías (archivos de extensión .img) y líneas de contorno como se muestra en la Figura 3. La distribución del techo en cada casa se simplificó en dos secciones con sus respectivas pendientes, por lo que se utilizaron dos

polígonos para simular cada superficie del techo. Se calcularon las curvas IDF utilizando datos de precipitación máxima de las estaciones de precipitación más cercanas a la región de estudio, y aplicando una distribución extrema de tipo I, las curvas IDF se muestran en la Figura 4.

Para cada techo, se calcularon hidrógrafos aplicando la metodología explicada en el punto 2, utilizando un número de curva de 98 y 86, para un techo convencional con materiales bituminosos y techos verdes (relacionadas con el césped), respectivamente. Las entradas de agua de lluvia se estimaron utilizando diferentes períodos de retorno. Una vez construido el hidrógrafo, los volúmenes de agua generados por la escorrentía se pueden estimar utilizando la Ecuación 15. Donde V , es el volumen entre un intervalo de tiempo. Q_{i+1} y Q_i , son dos valores de flujo consecutivos según un intervalo de tiempo. Δt es un intervalo de tiempo seleccionado por el usuario. Las áreas para cada techo se calcularon utilizando Qgis.

$$V = \sum_i^n (Q_{i+1} - Q_i) \Delta t \quad (15)$$



Figura 3. Área de estudio, imagen basada en López, Barreto y Méndez (2014).

4 Resultados

En este artículo sólo se mostrarán los resultados de la cubierta con $I_d = 1$ debido a la magnitud de los datos. Los datos completos de la hidrología se muestran en las Tablas 1 a 5 (datos de Bqto-oficina). El hidrógrafo del techo 1 se muestra en la Figura 5. Cabe destacar que existe una disminución significativa de la escorrentía al usar techos verdes, lo que se puede traducir en el almacenamiento de agua que

está relacionado con el espesor del suelo de la matriz, las especies de vegetación y la porosidad del suelo. El espesor del suelo de la matriz se estimó añadiendo la tasa de infiltración del período de retorno de 50 años y asumiendo una porosidad total del 20%, y una porosidad efectiva del 10%, dando un espesor de 15 cm, pero se utilizó como 20 cm. Las Hidrográficas del techo 1, con y sin techo verde para cada período de retorno se muestran desde la Figura 6 a 8.

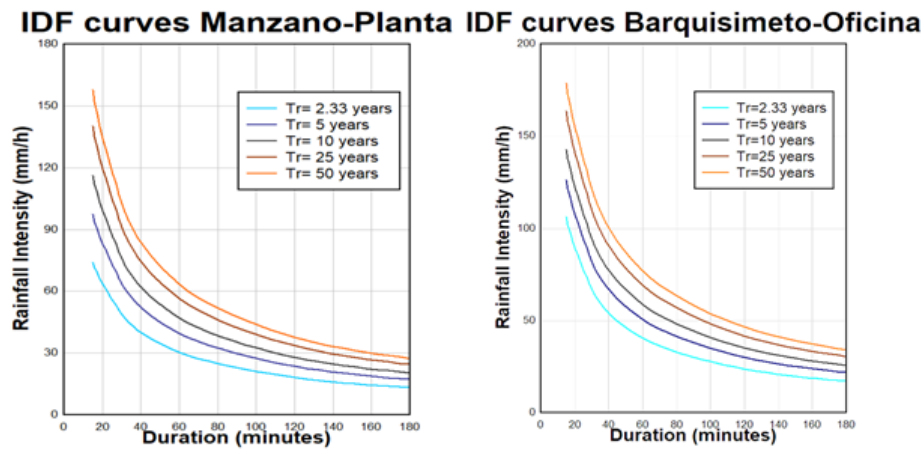


Figura 4. Curvas IDF para la estación “Manzano-Planta” y “Bqto-Oficina”. Imágenes basadas en López, Barreto y Méndez (2014).

Tabla 1. Hidrográficas del techo 1 (Tr=2,33 años).

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Capa de agua acumulada (mm)	Incremento de la capa de agua (mm)	Capa de infiltración (mm)	Volumen de escorrentía (mm)
0	0	0	0	0	0
1,667	150	4,167	4,167	2,244	0
3,333	150	8,333	4,166	4,167	0
5	150	12,5	4,167	4,047	0,122
6,667	147,895	16,433	3,933	3,416	0,754
8,333	134,474	18,677	2,244	2,713	1,216
10	123,994	20,666	1,989	1,219	0,766

Tabla 2. Hidrográficas del techo 1 (Tr=5 años).

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Capa de agua acumulada (mm)	Incremento de la capa de agua (mm)	Capa de infiltración (mm)	Volumen de escorrentía (mm)
0	0	0	0	0	0
1,667	160	4,444	4,444	4,444	0
3,333	160	8,889	4,445	4,434	0,009
5	160	13,333	4,444	3,904	0,543
6,667	160	17,778	4,445	3,215	1,225
8,333	160	22,222	4,444	2,705	1,743
10	160	26,667	4,445	2,305	2,145

Se observa que hay una considerable reducción del flujo máximo, también se retrasa el tiempo pico, pero no muy significativamente como se muestra en la Tabla 6. El volumen total de agua de lluvia que podría almacenarse en los techos verdes se deter-

mina a través de la porosidad efectiva de la matriz del suelo. Suponiendo que la porosidad efectiva sea de aproximadamente el 10%, el volumen total de almacenamiento para el techo 1 se muestra en la Tabla 7, y en la Tabla 8 en todos los techos.

Tabla 3. Hidrografías del techo 1 (Tr=10 años).

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Capa de agua acumulada (mm)	Incremento de la capa de agua (mm)	Capa de infiltración (mm)	Volumen de escorrentía (mm)
0	0	0	0	0	0
1,667	180	5	5	5	0
3,333	180	10	5	4,93	0,069
5	180	15	5	4,13	0,873
6,667	180	20	5	3,35	1,65
8,333	180	25	5	2,77	2,227
10	167,386	27,898	2,898	1,398	1,499

Tabla 4. Hidrografías del techo 1 (Tr=25 años).

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Capa de agua acumulada (mm)	Incremento de la capa de agua (mm)	Capa de infiltración (mm)	Volumen de escorrentía (mm)
0	0	0	0	0	0
1,667	190	5,278	5,278	5,278	0
3,333	190	10,556	5,278	5,157	0,12
5	190	15,833	5,277	4,228	1,05
6,667	190	21,111	5,278	3,408	1,873
8,333	190	26,389	5,278	2,798	2,478
10	190	31,667	5,278	2,348	2,934

Tabla 5. Hidrografías del techo 1 (Tr=25 años).

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Capa de agua acumulada (mm)	Incremento de la capa de agua (mm)	Capa de infiltración (mm)	Volumen de escorrentía (mm)
0	0	0	0	0	0
1,667	200	5,556	5,556	5,556	0
3,333	200	11,111	5,555	5,376	0,183
5	200	16,667	5,556	4,326	1,235
6,667	200	22,222	5,555	3,455	2,103
8,333	200	27,778	5,556	2,825	2,733
10	200	33,333	5,555	2,345	3,205

Según la Tabla 6, la retención potencial de agua es mayor para eventos de lluvias pequeñas que para eventos grandes, y está relacionada con el volumen de lluvias y la capacidad de almacenamiento del techo. Las Tablas 7 y 8 muestran el volumen máximo de agua utilizable según un 10% de porosidad efectiva. El volumen real infiltrado de agua se estimó utilizando la Ecuación 15. Con P la densidad total de precipitación (mm), Q_i es la densidad total de infiltración (mm), Q es la densidad de la lluvia

(mm) y E es la evapotranspiración de la vegetación (mm). En esta investigación, $E = 0$. El volumen real de almacenamiento de agua lluvia para el techo 1 se muestra en la Tabla 9, el cual debe incluir la porosidad efectiva, a fin de obtener el volumen utilizable de agua como se muestra en las Tablas 10 y 11. De acuerdo con WRF (2016), la cantidad de agua necesaria en un hogar se observa en la Tabla 12.

$$P = Q_i + Q + E \quad (16)$$

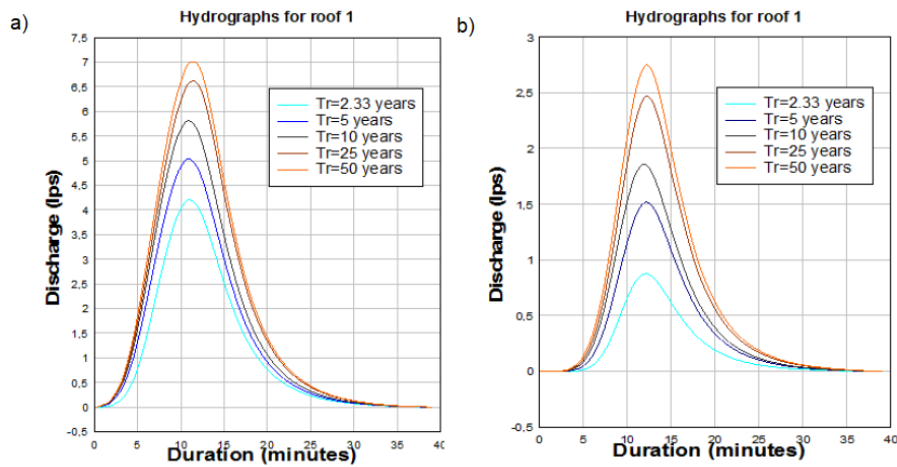


Figura 5. Hidrografía del techo 1 para diferentes períodos de retorno a) con techo verde y b) sin techo verde.

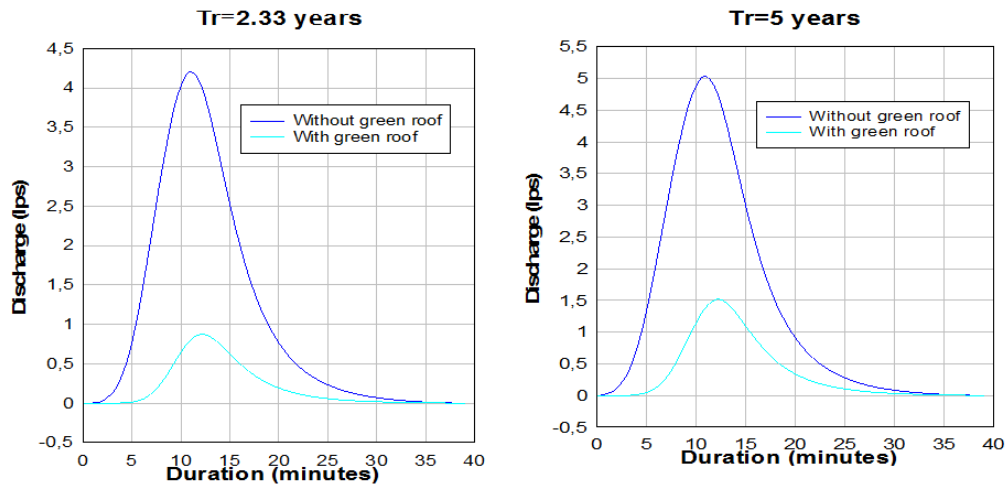


Figura 6. Hidrográficas del techo 1 (2,33 años a 5 años Tr).

Tabla 6. Reducción del pico del flujo e incremento del tiempo de pico para el techo 1.

Tr	Sin techos verdes		Con techos verdes		Reducción del pico del flujo (%)	Retraso en el tiempo pico (tiempo)
	Pico del flujo (lps)	Tiempo pico (min)	Pico del flujo (lps)	Tiempo pico (min)		
2,33	4,16	10,5	0,87	12	0,79	1,14
5	5,00	10,5	1,51	12	0,69	1,14
10	5,77	10,5	1,86	12	0,67	1,14
25	6,54	12	2,45	12	0,62	0,00
50	6,93	12	2,73	12	0,60	0,00

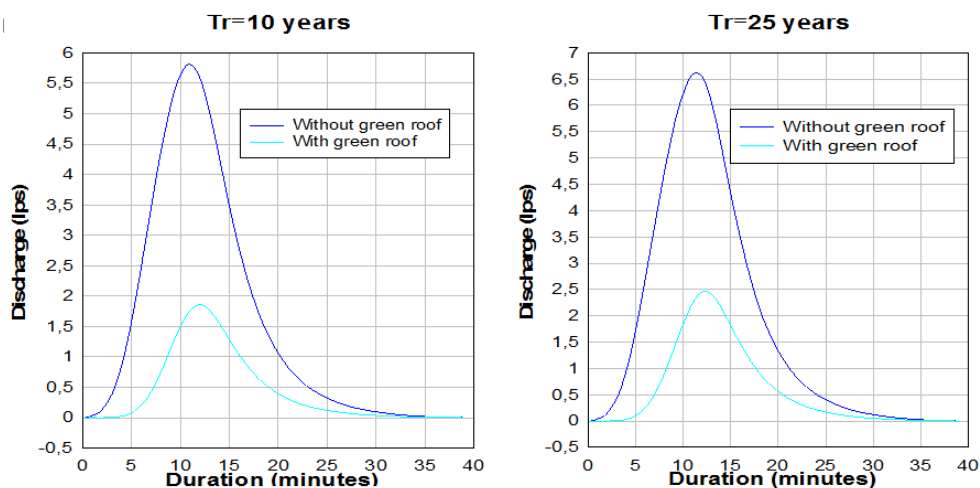


Figura 7. Hidrografías del techo 1 año a 25 años de Tr.

Tabla 7. Volumen máximo utilizable de agua en el techo verde 1.

ID	Superficie del techo (m^2)	Grosor del suelo (cm)	Porosidad efectiva %	Volumen máximo utilizable de agua (m^3)
1	163,03	20	0,10	3,26

Tabla 8. Volumen máximo utilizable de agua en todos los techos.

ID	Superficie del techo (m^2)	Grosor del suelo (cm)	Porosidad efectiva %	Volumen máximo utilizable de agua (m^3)
1-68	14.554,20	20	0,10	291,08

Tabla 9. El volumen real de infiltración para el techo 1.

ID	Superficie del techo (m^2)	Grosor del suelo (cm)	Porosidad efectiva %	Volumen máximo utilizable de agua (m^3)	Volumen real de infiltración (m^3)				
					2,33	5	10	25	50
1	163,03	20	0,10	3,26	1,98	2,28	2,40	2,59	2,66

Tabla 10. Volumen real utilizable para el techo 1.

ID	Superficie del techo (m^2)	Grosor del suelo (cm)	Porosidad efectiva %	Volumen máximo utilizable de agua (m^3)	Volumen real utilizable (m^3)				
					2,33	5	10	25	50
1	163,03	20	0,10	3,26	0,20	0,23	0,24	0,26	0,27

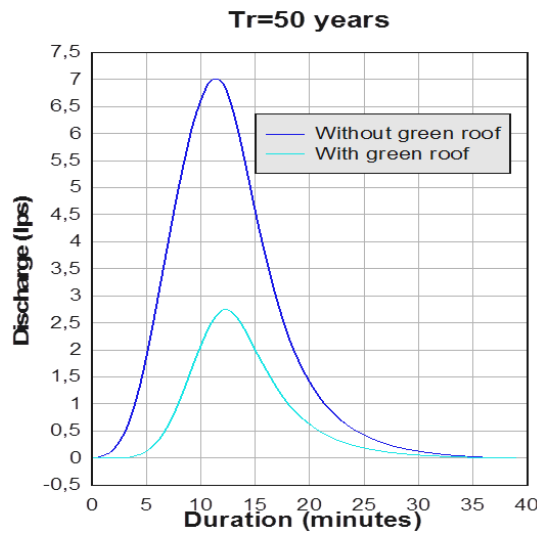


Figura 8. Información hidrológica del techo 1 por 50 años de Tr.

Tabla 11. Volumen real utilizable para todos los techos.

ID	Superficie del techo (m ²)	Grosor del suelo (cm)	Porosidad efectiva %	Volumen máximo utilizable de agua (m ³)	Volumen real utilizable (m ³)				
					2,33	5	10	25	50
1	14554,2	20	0,10	291,08	17,65	20,31	21,44	23,09	23,76

El agua de lluvia almacenada en los techos verdes podría ser reciclada para su uso doméstico. De hecho, el agua de lluvia no se puede utilizar para fines potables sin un tratamiento correcto, pero se puede usar para otros fines, como para para el agua del inodoro y el riego. Según WRF (2016), se necesitan 125 litros por hogar/día (33,1 gphd), para el

uso de inodoros. Teniendo en cuenta que, en promedio, una persona utiliza 5 veces el inodoro al día, si una parte del agua de lluvia pudiera almacenarse para ser utilizada para los inodoros, el propio urbanismo (68 casas) podría suministrar la demanda de agua como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 12. Cantidad de agua necesaria en litros por hogar y por día. Fuente WRF (2016).

Uso del agua	Cantidad (lphd)
Retrete	125.3 (24 %)
Ducha	106.4 (20 %)
Grifos	99.6 (19 %)
Lavadora de ropa	85.9 (16 %)
Fugas	64.4 (12 %)
Otras	20.1 (4 %)
Bañera	13.6 (3 %)
Lavaplatos	6.1 (1 %)
Total	521.3 (100 %)

Además, se podría obtener una significativa reducción del flujo máximo si se utilizan estructuras como los vertederos rectangulares en techos, como se muestra en la Figura 9. En las Figuras 10, 11 y 12 se puede observar el hidrógrafo de salida del techo 1 al aplicar el enrutamiento de los hidrógrafos, utilizando 2 vertederos de 10 cm de longitud y 10 cm de altura para cada período de retorno. Los techos

verdes son un buen reductor del flujo máximo, pero al combinarlos con los vertederos, la reducción del caudal máximo es aún mejor, aunque el volumen producido es el mismo, es decir, no hay almacenamiento adicional de agua para el uso de vertederos. Finalmente, el flujo máximo total para cada período de retorno se muestra en las Tablas 14 y 15.

Tabla 13. Días de suministro para los aseos (68 viviendas).

Tr	Agua almacenada (liters)	Suministro diario
2,33	17 652,68	2,08
5	20 308,50	2,39
10	21 441,40	2,52
25	23 086,58	2,72
50	23 755,79	2,79

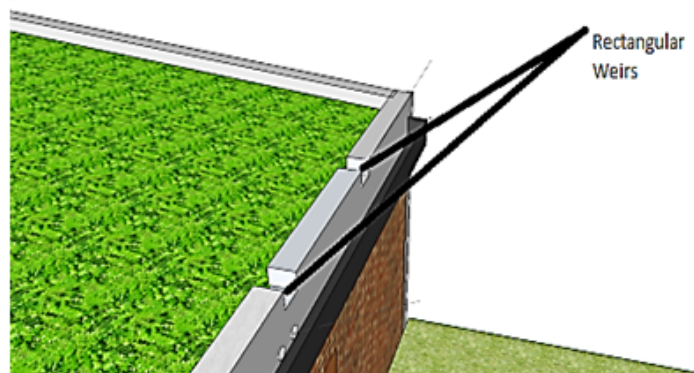


Figura 9. Vertederos rectangulares en los techos verdes.

Tabla 14. Flujo máximo para cada escenario (techo 1).

Tr	Flujo máximo (lps)			Reducción del flujo máximo (%)		Duración del hidrógrafo (min)	
	Techo ordinario	Techo verde	Techo verde y enrutamiento (vertederos)	Techo verde	Techo verde y enrutamiento (vertederos)	Techo verde	Techo verde y enrutamiento (vertederos)
2,33	4,161	0,874	0,064	78,995	98,462	40,0	>200
5	5,004	1,514	0,114	69,744	97,722	40,0	>200
10	5,778	1,86	0,15	67,809	97,404	40,0	>200
25	6,547	2,458	0,232	62,456	96,456	40,0	>200
50	6,936	2,738	0,27	60,525	96,107	40,0	>200

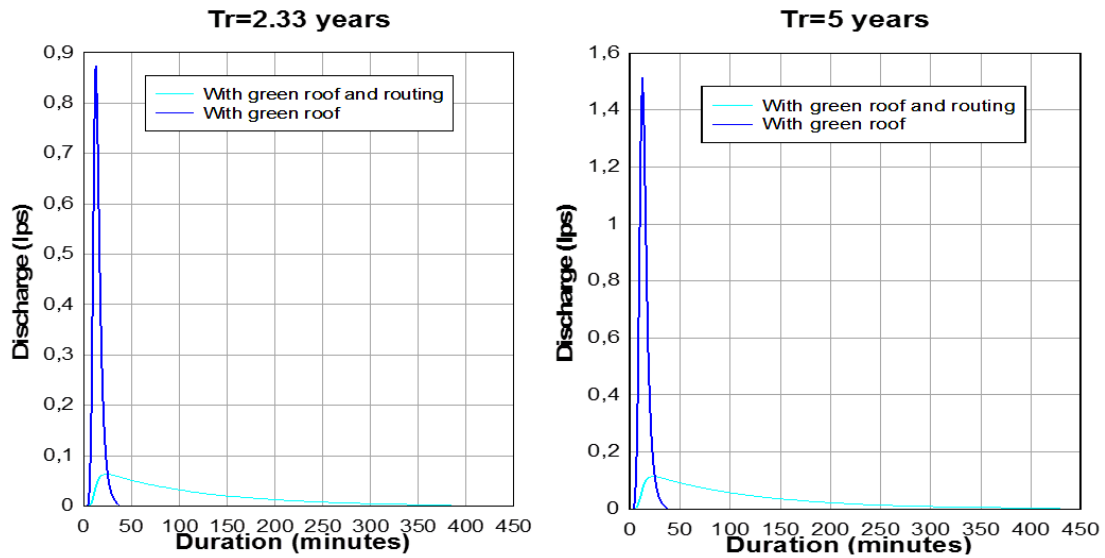


Figura 10. Hidrógrafos del techo 1 durante 2,33 años y 5 años de Tr.

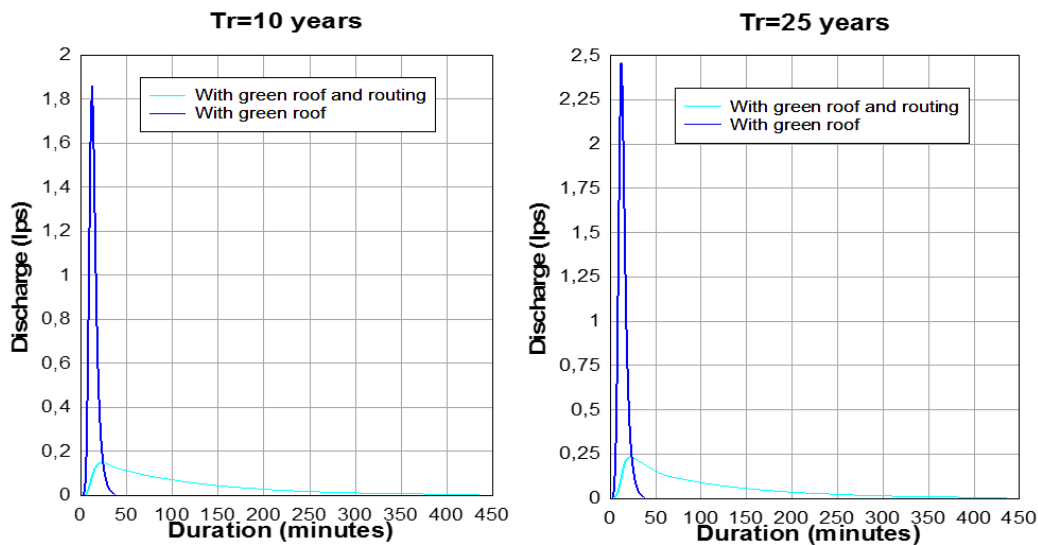


Figura 11. Hidrógrafos del techo 1 durante 10 años y 25 años de Tr.

Según la Tabla 14, la reducción del flujo máximo es superior al 96%, suponiendo a CN II y una primera lluvia, pero estos resultados podrían verse afectados por los continuos eventos de lluvia. Otra ventaja de utilizar los techos verdes y su enrutamiento es el diseño del drenaje urbano, y según la Tabla 16, existe una reducción significativa del volumen (techo ordinario vs techo verde) y la duración del hidrograma (techo verde vs techo verde y verdederos), lo que significa un impacto positivo en el sistema de drenaje. La disminución en el flujo máxi-

mo requerirá tuberías con diámetros más pequeños y pendientes más bajas que componen el sistema de drenaje, y usando la ecuación de dotación, a través de la cual el diámetro de las tuberías hará fluir el flujo total del urbanismo (Ecuación 17). Con Q la descarga, S la pendiente de la tubería, A es el área del flujo, R es la relación hidráulica y n es la rugosidad de la tubería.

$$Q = \frac{\sqrt{S} * A * R^{\frac{2}{3}}}{n} \tag{17}$$

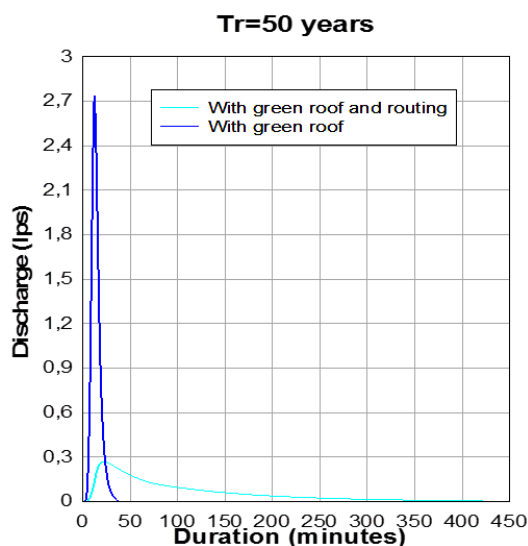


Figura 12. Hidrógrafos del techo 1 durante 50 años de Tr.

Tabla 15. Flujo máximo para cada escenario (todos los techos).

Tr	Flujo máximo (lps)		
	Techo ordinario	Techo verde	Techo verde y enrutamiento (vertederos)
2,33	371,491	77,978	4,395
5	446,689	135,007	7,941
10	515,813	165,995	10,505
25	584,451	219,436	16,175
50	619,191	244,369	18,82

Tabla 16. Diámetro requerido para cada escenario.

Tr	Techo ordinario	Diámetro requerido (mm)	Pendiente mínima (m/m)	Techo verde	Diámetro requerido (mm)	Pendiente mínima (m/m)	Techo verde y enrutamiento	Diámetro mínimo (mm)	Pendiente mínima (m/m)
2,33	371,491	500	0,01	77,978	280	0,005	4,395	200	0,005
5	446,689	500	0,01	135,007	315	0,01	7,941	200	0,005
10	515,813	500	0,01	165,995	355	0,01	10,505	200	0,005
25	584,451	500	0,02	219,436	355	0,02	16,175	200	0,005
50	619,191	500	0,02	244,369	355	0,02	18,82	200	0,05

Vale la pena destacar que existe una reducción significativa en los diámetros para el drenaje urbano (Locatelli y col., 2014; Pradhan, Al-Ghamdi y Mackey, 2019), casi un 100% de la reducción. De igual forma, estos resultados son válidos en casos del primer lavado o la primera lluvia, debido a que los techos verdes saturan más rápido la matriz del suelo, por lo que los resultados continuos de lluvia para el drenaje podrían verse afectados.

5 Conclusiones

Los techos verdes, además de ofrecer una buena alternativa ecológica para reponer zonas verdes en las áreas urbanas, también ofrecen una alternativa viable para la recogida y almacenamiento de agua de lluvia, que, según este estudio, puede alcanzar entre 2 y 3 días de uso para los baños en las zonas urbanas (según la intensidad de las precipi-

taciones), que podrían representar ahorros para la economía de los habitantes y a un nivel macro, para la economía del estado.

Además, la colocación de estructuras reguladoras del caudal, como los vertederos, ofrecen una ventaja en la producción del pico máximo de los hidrógrafos de los techos y por lo tanto de la urbanización. Según los resultados del urbanismo para las primeras lluvias, el uso combinado de techo verde y vertederos ofrecen un retraso significativo en la duración total de los hidrógrafos, casi tres veces más en comparación con el techo convencional (bajo las condiciones estudiadas en esta investigación), ayudando con el drenaje urbano y reduciendo los diámetros comerciales de las tuberías casi a la mitad del tamaño.

El almacenamiento de agua para diversos usos durante la vida útil de la casa, ayuda a preservar el nivel de agua de los embalses y de los flujos ecológicos de los canales naturales y su sección transversal; el almacenamiento de agua de lluvias propuesto en esta investigación tiene un buen rendimiento no sólo para ser usado en el drenaje, sino en el hecho, pues retrasa el tiempo máximo de flujo del urbanismo y la duración total del hidrógrafo, creando una brecha entre el flujo máximo hidrológico del urbanismo y el flujo máximo hidrológico de los canales naturales para la descarga, disminuyendo así el riesgo de inundaciones.

Se recomienda realizar un estudio sobre el retención de agua no sólo desde el techo, sino también desde el hidrógrafo con estructuras de almacenamiento para aumentar la capacidad de almacenamiento del agua de lluvia; de igual forma, llevar a cabo estudios para determinar la CN real para estas estructuras.

Referencias

- Arabi, R. y col. (2015). «Mitigating urban heat island through green roofs». En: *Current World Environment* 10.1, 918-927. Online: <https://bit.ly/2ViMLOt>.
- BCIT (2018). *Centre for Architectural Ecology*. Último acceso: 21 August 2018. URL: <https://bit.ly/382iGYr>.

- Berardi, U., A. GhaffarianHoseini y A. GhaffarianHoseini (2014). «State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs». En: *Applied Energy* 115, 411-428. Online: <https://bit.ly/3fZiYxn>.
- Chow, V. T., D. Maidment y L. Ways (1994). *Hidrología Aplicada*. Ed. por McGraw Hill. Bogotá.
- Connelly, Maureen y Murray Hodgson (2013). «Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs». En: *Applied Acoustics* 74.10, 1136-1143. Online: <https://bit.ly/2ZeDIEZ>.
- EPA, A. E. P. (2018). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Green roofs*. Ed. por United States Environmental Protection Agency. Último acceso: 18 August 2018. URL: <https://bit.ly/3evszQZ>.
- Escobedo, F. y col. (2006). «The socioeconomics and management of Santiago de Chile's public urban forests». En: *Urban Forestry & Urban Greening* 4.3-4, 105-114. Online: <https://bit.ly/3fWDgfg>.
- Fenton, J. (2009). «Reservoir routing». En: *Hydrological Sciences Journal* 37.3, 233-246. Online: <https://bit.ly/3i3FP1y>.
- Fioretti, R. y col. (2010). «Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate». En: *Building and environment* 45.8, 1890-1904. Online: <https://bit.ly/2VghyeI>.
- Francis, R. y J. Lorimer (2011). «Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls». En: *Journal of environmental management* 92.6, 1429-1437. Online: <https://bit.ly/2Zhhj4u>.
- Huang, J (1994). *Roof garden design and construction*. Ed. por China Forestry Press. Beijing.
- Ilbay-Yupa, M., B.R. Zubieta y W. Lavado-Casimiro (2019). «Regionalización la precipitación agresividad y concentración la Cuenca del ruayas, Ecuador». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 30.2, 57-76. Online: <https://bit.ly/2P9eCNE>.
- Liu, Wen y col. (2019). «The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments». En: *Journal of Hydrology* 569, 230-238. Online: <https://bit.ly/2BL92gJ>.
- Locatelli, L. y col. (2014). «Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications». En: *Journal of Hydrology*.
- López, N., W. Barreto y N. Méndez (2014). «Techos verdes como solución al problema de inundaciones».

- nes en medios urbanos». En: *Gaceta Técnica DIC* 14, págs. 9-20.
- MacIvor, J. y J. Lundholm (2011). «Insect species composition and diversity on intensive green roofs and adjacent level-ground habitats». En: *Urban ecosystems* 14.2, 225-241. Online: <https://bit.ly/3g1iZ8J>.
- Minke, G. (2017). «Inclined Green Roofs - Ecological and Economical Advantages, Passive heating and cooling effect.». En: *Conference Central Europe towards Sustainable Building: proceedings*. Ed. por Faculty of Civil Engineering. Czech Technical University, Prague, Czech Republic.
- NRCS (1973). *A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds*. Último acceso: 18 August 2018. URL: <https://bit.ly/3eDmqCf>.
- Olivares, B. O. (2018). «Condiciones tropicales de la lluvia estacional en la agricultura de secano de Carabobo, Venezuela.». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 27.1, 86-102. Online: <https://bit.ly/3hRE7iI>.
- Pradhan, S., S. Al-Ghamdi y H. Mackey (2019). «Greywater recycling in buildings using living walls and green roofs: A review of the applicability and challenges». En: *Science of The Total Environment* 652, 330-344. Online: <https://bit.ly/2YDKBQ4>.
- QGIS, Development Team (2014). *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. URL: <http://qgis.osgeo.org>.
- Ramke, H (2018). «Solid Waste Landfilling». En: Elsevier. Cap. 8.2 Drainage Systems-Collection of Surface Runoff and Drainage of landfill Top Cover Systems, págs. 373-416.
- Reyes, S. e I. Figueroa (2010). «Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile». En: *EURE (Santiago)* 36.109, 89-110. Online: <https://bit.ly/3dBLFDU>.
- Romero, H. y A. Vásquez (2005). «La comodificación de los territorios urbanizables y la degradación ambiental en Santiago de Chile». En: *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales* 9.194, 1-68. Online: <https://bit.ly/383rE7U>.
- Serrano, S., J. C. Ruíz y F. Bersosa (2017). «Heavy rainfall and temperature projections in a climate change scenario over Quito, Ecuador.». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 25.1, 16-32. Online: <https://bit.ly/313gsFn>.
- Serrano, S. y col. (2012). «Ansis estadico de datos meteorolos mensuales y diarios para la determinaci variabilidad climca y cambio climco en el Distrito Metropolitano de Quito». En: *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 16.2, 23-47. Online: <https://bit.ly/3fIS7iV>.
- Shafique M. and Kim, R. y M. Rafiq (2018). «Green roof benefits, opportunities and challenges—A review». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, 757-773. Online: <https://bit.ly/2NwCF8a>.
- Sims, A. y col. (2016). «Retention performance of green roofs in three different climate regions». En: *Journal of Hydrology* 542, 115-124. Online: <https://bit.ly/2CENbbm>.
- Technology, G. R. (2018). *Advantages of green roofs*. Último acceso: 21 August 2018. URL: <https://greenrooftechnology.com>.
- TxDOT, Texas Department of Transportation (2019). *Hydraulic Design Manual*. Último acceso: June 10, 2020. URL: <https://bit.ly/3eDzEPy>.
- Vásquez, A. y H. Romero (2008). «Vegetación Urbana y Desigualdades Socioeconómicas en la comuna de Peñañolen, Santiago de Chile». Tesis de mtría. Universidad de Chile, pág. 102.
- Vijayaraghavan, K. (2016). «Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends». En: *Renewable and sustainable energy reviews* 57, 740-752. Online: <https://bit.ly/31n7nsO>.
- Viola, F., M. Hellies y R. Deidda (2017). «Retention performance of green roofs in representative climates worldwide». En: *Journal of Hydrology* 553, 763-772. Online: <https://bit.ly/2A6jlpR>.
- WRF (2016). W.R.F., *Residential End Uses of Water, Version 2. Excecutive report.. s.l.:s.n.*
- Yang, J., Q. Yu y P. Gong (2008). «Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago». En: *Atmospheric environment* 42.31, 7266-7273. Online: <https://bit.ly/2Vlr1BF>.