

TECHOS VERDES COMO SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE INUNDACIONES EN MEDIOS URBANOS

GREEN ROOFS AS A SOLUTION TO INUNDATIONS PROBLEM IN URBAN ENVIROMENTS

López, N. *, Barreto, W. **, Méndez, N. **

Recibido 15/11/2015 Aprobado: 03/12/2015

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó empleando modelos matemáticos, con la finalidad de comparar la escorrentía producida en un urbanismo con condiciones actuales de techos de tejas criollas, contra otro donde se usan estructuras o dispositivos de almacenamiento y retención de agua en casas, patios, parcelas, calles y contra urbanismos en general. Se seleccionó una zona de estudio en el Estado Lara (Venezuela), en el municipio Palavecino, en las inmediaciones de la Quebrada Tabure, considerando los techos verdes desde el punto de vista de reductores de escorrentía. Se elaboró una aplicación llamada “TechosVerdes.py” en el programa de licencia libre Python, con aproximadamente 4600 líneas de código para calcular los hidrogramas de los techos, patios, calles y áreas verdes, basándose en un mosaico creado con imágenes tipo raster en el programa Quantum Gis. La investigación se basó en la comparación directa de trece escenarios hipotéticos, donde se utilizó techos verdes y adicionalmente, tanques de almacenamiento y brocales, con un escenario original en condiciones actuales, sin alteraciones. Se obtuvo como resultado en los hidrogramas calculados para los escenarios hipotéticos, que el caudal pico disminuye, achatándose el hidrograma.

Palabras clave: Escorrentía, techos verdes, Python, hidrogramas, Venezuela

*Docente Investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Ingeniero Civil. Especialista en Recursos Hidráulicos, Cursante de la Maestría en Mecánica Aplicada a la Construcción. Correo: nelson.lopez@ucla.edu.ve

**Docente Investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Ingeniero civil. Master of Science en Hidroinformática. Doctor en Hidroinformática. Especialista en recursos hidráulicos con énfasis en la modelación hidráulica y drenaje urbano. Correo: wbarreto@ucla.edu.ve

***Docente Investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Ingeniero Agrónomo, M.Sc. Desarrollo de Aguas y Tierras, Especialista en Ingeniería Hidráulica, M.Sc. Ingeniería Hidráulica. Doctor en Ingeniería. Correo: nmendez@ucla.edu.ve

ABSTRACT

This research was carried out using mathematical models in order to compare the runoff from an urban planning with handmade tiles roofs in actual conditions, with one where structures or storage devices and water retention in houses, yards are used, parcels, streets and housing complexes in general. A study area in the state of Lara, Venezuela, in Palavecino municipality, near Quebrada Tabure, was selected and green roofs are considered from the point of view of reducing runoff. An application called "TechosVerdes.py" was made under the license free Python program with approximately 4600 code lines was developed to calculate hydrographs from roofs, patios, streets and green areas, based on a mosaic created with type raster images in the Quantum Gis program. The research was based on the direct comparison of thirteen scenarios where green roofs were used and additionally, storage tanks and parapets, with an original scenario on current conditions without alterations. In the hydrographs produced by hypothetical scenarios it was determined that the peak flow decreases squashing the hydrograph.

Keywords: *Runoff, green roofs, Python, hydrograms, Venezuela*

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la creciente organización de las ciudades ha incrementado la proporción de zonas impermeables en las mismas, lo que se traduce en un impacto negativo en zonas construidas. La progresiva y descontrolada impermeabilización del terreno provoca determinadas alteraciones hidrológicas e hidráulicas, que traen como consecuencia el incremento del tiempo de respuesta de la cuenca a las precipitaciones, así como el aumento de los volúmenes escurridos y por ende, afectando los hidrogramas aguas abajo de las zonas urbanizadas. De esta forma, disminuye paulatinamente la posibilidad de la recarga de acuíferos.

Además de lo anteriormente expuesto, el crecimiento de las ciudades sin planificación, puede causar la alteración de los cauces naturales, generando la necesidad de construir cauces artificiales, acarreado eventualmente problemas mayores como inundaciones, caudales por encima del caudal de rebose de las vías, colapso de drenajes longitudinales y transversales de las vías, retardos en los horarios de trabajo de los habitantes, aunado a la tensión a nivel social causada por los motivos mencionados.

El agua cuenta con un ciclo hidrológico que mantiene un equilibrio entre la evaporación, condensación, precipitación e infiltración de la zona. En dichos procesos, los cauces naturales toman dimensiones para poder transitar los caudales generados [1]. Sin embargo, al construir ciudades se altera este ciclo, reduciéndose el proceso de infiltración y la escorrentía generada es mucho mayor, contaminándose esta última con los poluentes generados en las ciudades, que se depositarán en cauces y calles, que podrían no ser aptos en conducir los excedentes y por tanto, causar inundaciones además de contaminar el agua.

Por consiguiente, el trabajo de investigación que aquí se presenta tiene la finalidad de estudiar el comportamiento de la escorrentía en zonas urbanas utilizando techos verdes. El estudio se basa en la hipótesis de que la capacidad de infiltración de un techo convencional es casi nula, en comparación con la capacidad de infiltración de un techo que posea vegetación, y un sustrato que permita su desarrollo. El resultado obtenido con este planteamiento es una reducción del caudal pico generado por el techo, debido a que parte del agua queda retenida en la matriz de suelo, otra será absorbida por la vegetación, y el resto escurrirá de manera superficial y subsuperficial.

En este trabajo se crearon simulaciones, utilizando para ello un sistema de información geográfico, que permitió la pronta extracción de datos requeridos para el cálculo de hidrogramas, así como también, el desarrollo de una aplicación que permitió el procesamiento de dicha data para el cálculo de los parámetros necesarios para realizar comparaciones entre los distintos escenarios considerados. Posteriormente, se efectuó la interacción entre el sistema de información geográfico para la visualización de los datos ya procesados, y dichos cálculos. Se elaboró una aplicación llamada *TechosVerdes.py* en el programa de licencia libre Python (<https://www.python.org/about/gettingstarted/>), con aproximadamente 4600 líneas de código para calcular los hidrogramas de los techos, patios, calles y áreas verdes [2], basándose en un mosaico creado con imágenes tipo ráster en el programa Quantum Gis (<http://www.qgis.org/es/site/>).

En techos convencionales la formación del hidrograma de escorrentía directa es casi inmediata, debido a la tasa de infiltración casi nula. Con el tipo de techos verdes propuesto se obtuvo que la respuesta del mismo en la forma planteada se retardara, creando un hidrograma con una duración mayor al generado por un techo convencional, reduciendo de esta manera el caudal pico.

2. DESARROLLO

Los techos verdes son considerados como cubiertas vegetativas en edificios, utilizados en los techos de las viviendas para reducir o absorber casi en su totalidad la precipitación pluvial [3]. De esta manera, se aumenta la capacidad de absorción de la tierra sobre la cual está construida la edificación. Existen trabajos relacionados con este tema, en Bélgica se sometió un techo convencional, y un techo verde de tipo extensivo con pendiente de 20° a un mismo evento de precipitación, demostrando que en efecto, el uso de este reduce la escorrentía debido a su capacidad de almacenamiento [4].

En Münster Alemania, fueron monitoreados 23 techos verdes de 12 m² cada uno durante dos años, llegando a la conclusión de que la reducción del caudal pico en los techos no depende solamente de la profundidad del suelo o la pendiente del mismo, sino también de la evapotranspiración y a la secuencia de períodos secos y húmedos [5]. Por otro lado, en [6] se monitoreó un techo verde para ciertas tormentas entre 2005 y 2011. Los resultados obtenidos fueron comparados con un techo convencional de dimensiones similares, llegando a la conclusión de que en el primero se redujo entre 80% y 100% el volumen de escorrentía generada por eventos menores a 0,10 pulgadas, mientras para eventos mayores a 0,10 pulgadas, la reducción del volumen de escorrentía era como mínimo del 45%.

Otro trabajo reciente es [7], en el que se evaluó el impacto del uso de techos verdes y techos marrones de 35.3 m² en la universidad de Birmingham, en diversos aspectos, llegando a la conclusión de que los techos verdes tienen un mejor comportamiento en lo que respecta a hidrología.

2. METODOLOGIA

El esquema de trabajo para evaluar lo planteado se realizó de la siguiente manera: el agua precipita sobre los techos de la vivienda produciendo un hidrograma de escorrentía, el cual se transitó por vertederos o tuberías existentes en las cubiertas, retardando dicho hidrograma generado. Para el caso del presente estudio, los techos se encontraban escurriendo a dos aguas, por lo que se dividió cada uno de ellos en dos partes, la parte 1-A y la parte 1-B, tal como se observa en la Figura 1.

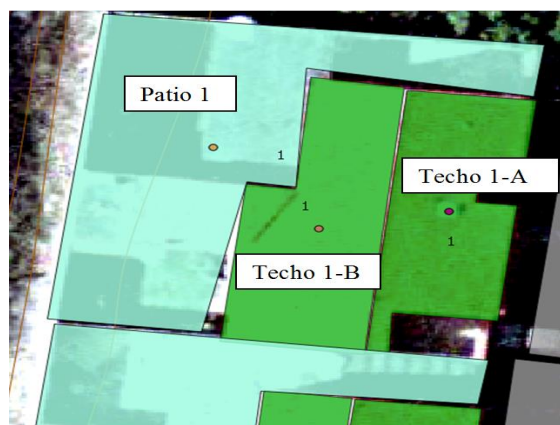


Figura 1. Representación de nomenclatura de techos

El hidrograma de salida se depositó en una canal el cual lo dirigió hasta un tanque de almacenamiento generando un segundo tránsito. Por último, fue depositado en los patios de las viviendas donde se produjo el último tránsito del mismo, para finalmente ser acumulado

en las calles del urbanismo (ver Figura 2).

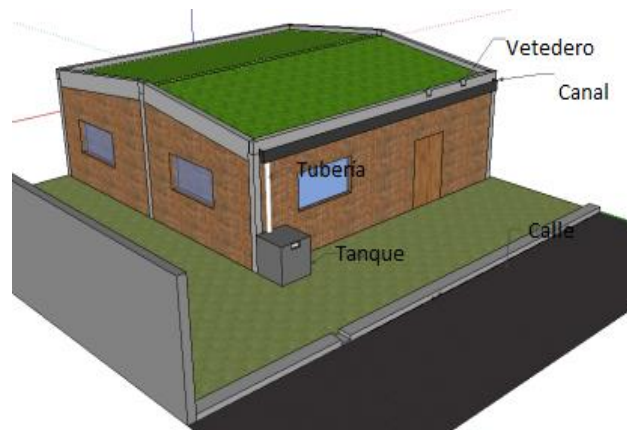


Figura 2. Esquema global de funcionamiento planteado

El hidrograma de escorrentía generado por los techos fue transitado por medio de vertederos o tuberías y fue depositado en una canal, produciéndose un primer almacenamiento de agua debido a la elevación de la base del vertedero o de la tubería, (ver Figura 3). Este almacenamiento fue afectado por la porosidad del suelo del cultivo, es decir, que en la curva altura-área-capacidad, el volumen almacenado por cada diferencial de altura debe ser multiplicado por la porosidad del suelo.

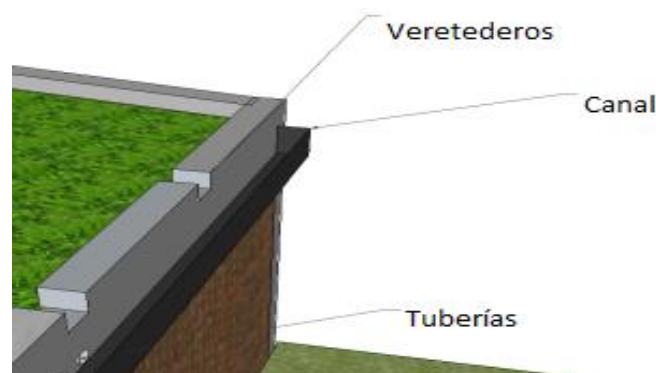


Figura 3. Vertederos y tuberías ubicados en los techos

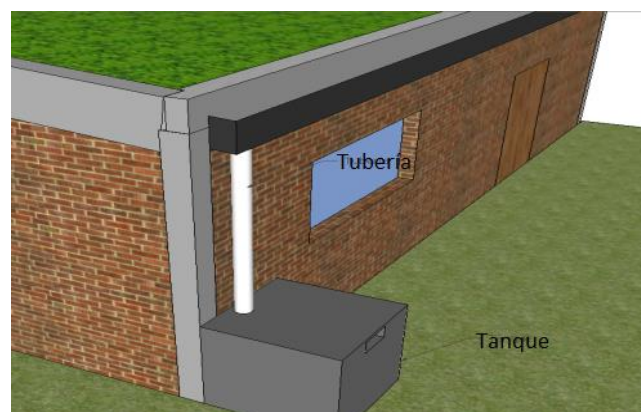


Figura 4. Tubería que conduce el hidrograma de los techos hasta el tanque

También se tomó en consideración el aporte del flujo subsuperficial de los techos, cuyo el caudal pico fue muy bajo con respecto al hidrograma producido por los mismos, además de que existió una diferencia de tiempo considerable entre la producción de ambos caudales picos, es importante considerarlo para determinar el almacenamiento. El hidrograma de salida generado por el tránsito, fue conducido hasta un tanque, en donde se almacenó parte del agua y escurrió el exceso realizando un nuevo tránsito (ver Figura 4). El exceso de agua transitada por el tanque se depositó en los patios, donde se realizó un nuevo tránsito al colocarse estructuras como vertederos o tuberías (ver Figura 5).



Figura 5. Vertederos y tuberías ubicados en los patios

14 La información requerida para la generación de los hidrogramas se obtuvo con la utilización de un Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante el programa de licencia libre Quantum Gis (<http://www.qgis.org/es/site/>), en el cual se realizó un mosaico que abarcó las urbanizaciones cercanas a la quebrada Tabure en el municipio Palavecino del Estado Lara, con el uso de fotografías y curvas de nivel obtenidas del levantamiento hecho por LAVALIN (<http://www.snclavalin.com/en/>). Los escenarios planteados para las simulaciones con las aplicaciones en PYTHON y Quantum GIS fueron los siguientes (ver Tabla 1).

Tabla 1. Escenarios planteados a nivel de parcela

Escenario original	Se simularon los techos con curva número correspondiente a techos sin vegetación (teja criolla), sin realizar tránsito alguno.
Escenario 1:	Se simularon los techos con curva número correspondiente a techos con vegetación.
Escenario 2:	Se transitaron los hidrogramas obtenidos en el escenario 1, a nivel de parcela.
Escenario 3:	Se depositaron los hidrogramas obtenidos en el escenario 1, hasta un tanque de almacenamiento, en donde se realizó un segundo tránsito.
Escenario 4:	Se colocaron vertederos en los techos, a fines de transitar la escorrentía superficial y retardar el caudal pico.
Escenario 5:	Es similar al escenario 1, solo que se tomó en cuenta el flujo subsuperficial.
Escenario 6:	Es similar al escenario 5, con la diferencia de que se realizó tránsito de flujo superficial y subsuperficial.
Escenario 7:	Es similar al escenario 3, con la diferencia que se tomó en cuenta el flujo subsuperficial.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos para el techo N° 1 (ver Figura 1), con un periodo de retorno de 5 años, se pueden observar en la figura 6 el hidrograma de escorrentía del escenario original (techo de tejas criolla), y en la figura 7 los resultados para el escenario con techo verde (escenario 2). Del reporte de los resultados del programa se obtuvo, que el mayor impacto se produce para periodos de retorno pequeños como $Tr=2,33$ años y $Tr=5$ años, mientras que a medida que aumenta este, los porcentajes de reducción de volumen y caudal pico tienden a tomar una pendiente horizontal.

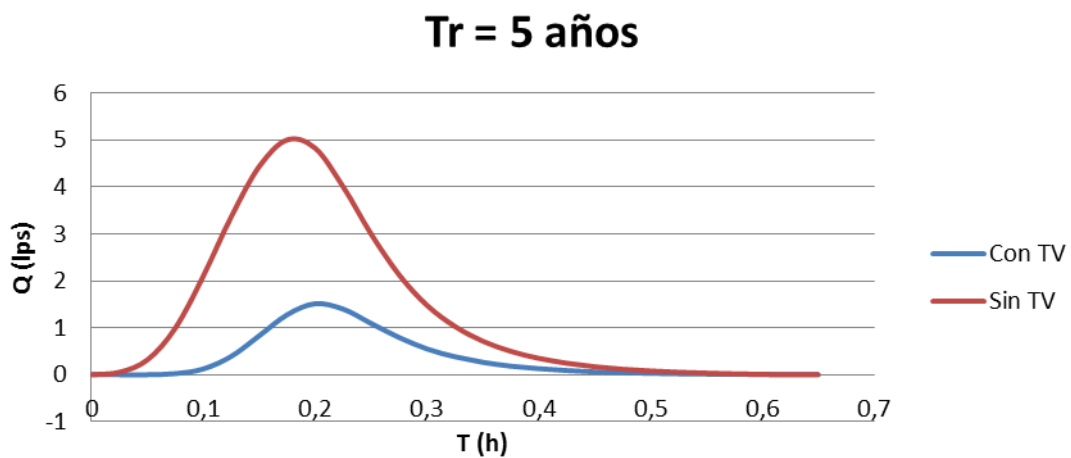


Figura 6. Hidrogramas comparativos para $Tr = 5$ años

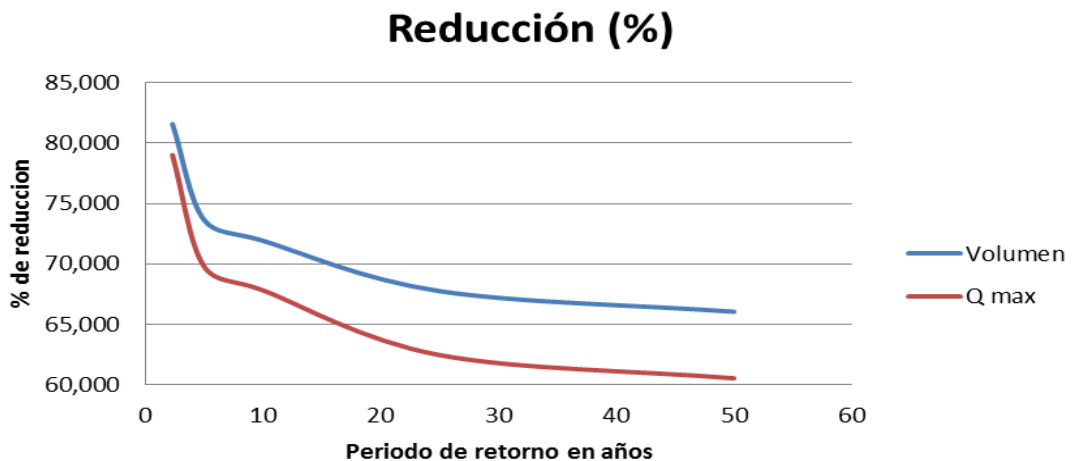


Figura 7. Reducción del caudal pico solo en el techo

Hasta ahora se ha evaluado el impacto que tiene el uso del techo verde para este escenario 2, sin embargo, otro patrón de comparación a nivel macro es el estudio a nivel de parcela, es decir, la sumatoria del hidrograma generado por el techo y el hidrograma generado por el patio. Para la parcela 1 se muestran los hidrogramas obtenidos utilizando el techo verde y sin

utilizar el techo verde (ver Figura 8).

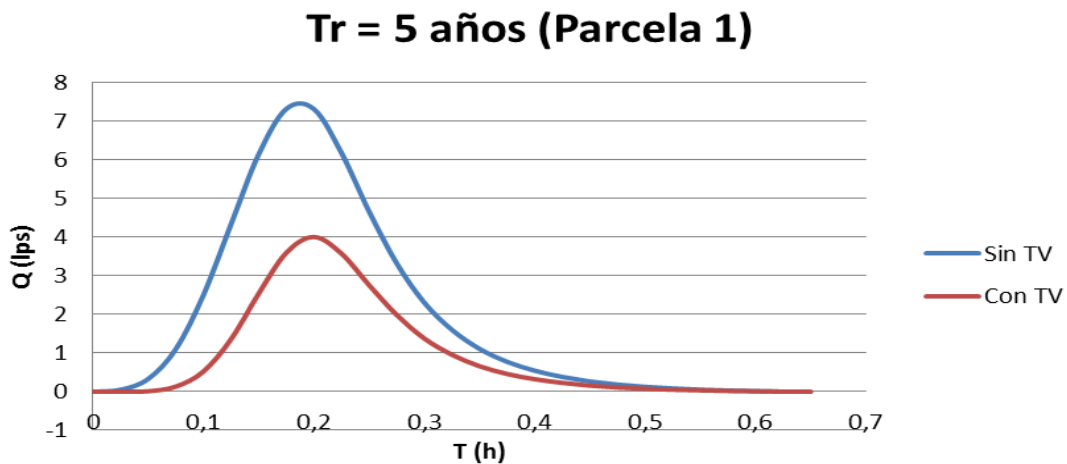


Figura 8. Hidrogramas para parcela 1, con techo verde y sin techo verde

Si adicional al techo verde, se colocan tanques de almacenamiento, se obtienen los resultados mostrados en la figura 9. Este escenario, contempla un tanque de almacenamiento para retener el agua que drena de los techos.

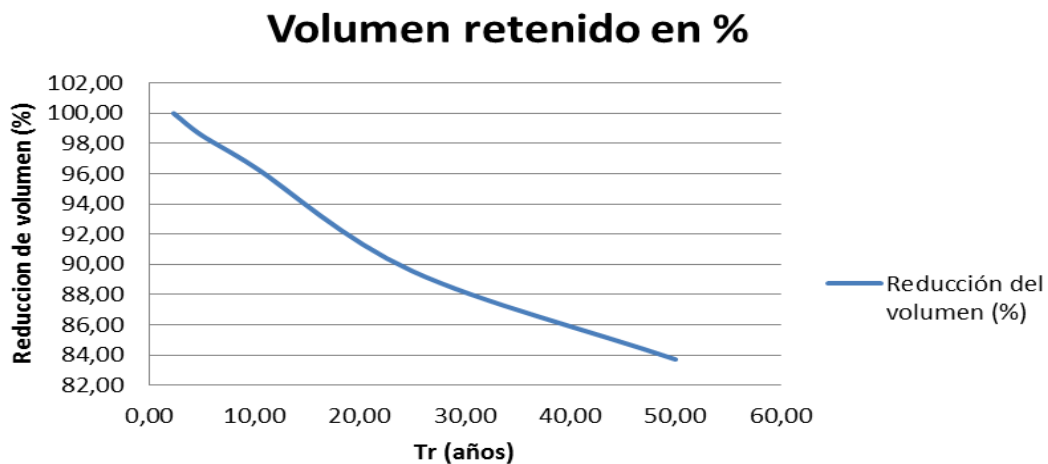


Figura 9. Reducción del volumen para a nivel de techos

Para efectos de esta simulación, se utilizaron depósitos de 1,20 x 1,20 x 1,20 m, con una estructura de salida tipo vertedero de 10 cm de base, 10 cm de altura y ubicado a 1,10 m de alto, de manera que la capacidad máxima de retención de agua por cada uno es de 1584,00 litros. Se observó que un tanque de almacenamiento es capaz de amortiguar hasta un 100 % de la escorrentía para períodos de retorno pequeño, además permite almacenar agua que pudiera ser destinada por ejemplo a riego o al lavado de autos. La retención del flujo dependerá de las dimensiones del tanque de almacenamiento, aumentando la capacidad de retención conforme aumenten las dimensiones del tanque (ver Figura 10).

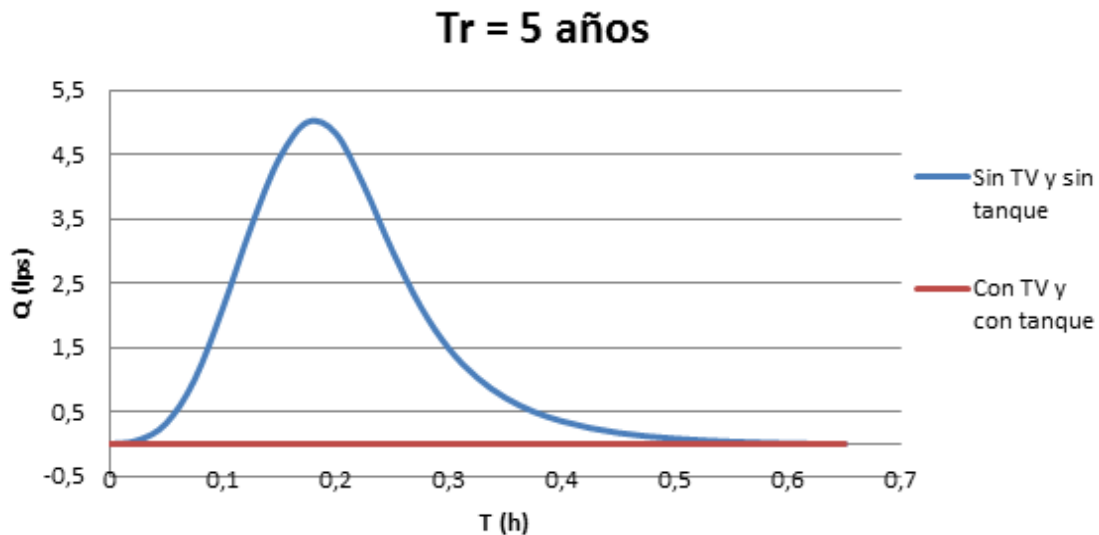


Figura 10. Hidrograma para parcela 1, utilizando el tanque de almacenamiento y sin usarlo

En la Figura 11, de acuerdo a la capacidad del tanque, la reducción del caudal aumenta conforme aumentan las dimensiones del tanque, ya que la cantidad de agua producida por los techos y parcelas aumentan en la medida que se acrecienta el período de retorno, al colocarse tanques con altas capacidades, estos podrán retener mayor cantidad de agua amortiguando hidrogramas para mayores períodos de retorno.

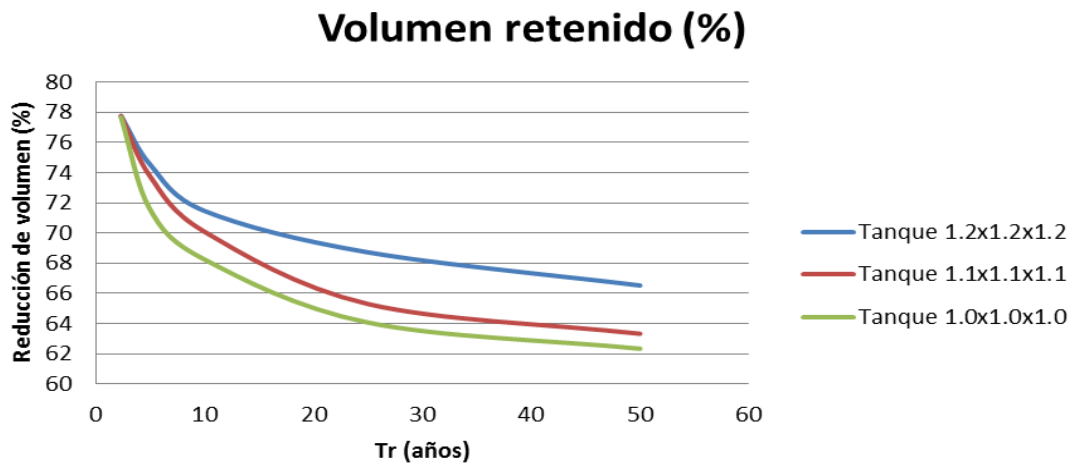


Figura 11. Reducción de volumen para diferentes capacidades

Existen dos hidrogramas de escorrentía por cada techo, el de escorrentía superficial y el de escorrentía subsuperficial. Este último se genera con las láminas de agua infiltrada en el suelo de cada techo. Parte de este hidrograma subsuperficial, quedara retenida en la matriz de suelo, no pudiendo salir por fuerzas gravitatorias, solo podrá hacerlo mediante evaporación y consumo del cultivo. Para el cálculo de este volumen retenido, es necesario conocer la capacidad de campo del suelo y la porosidad del mismo.

Para transitar el hidrograma subsuperficial, el hidrograma de entrada será reducido por la

capacidad de campo, y la cantidad de agua que puede salir por las tuberías será afectada por la porosidad, esto debido a la obstrucción de las mismas por el suelo, y solo la porosidad del mismo es la que permite la salida del agua, lo que genera un retardo en la salida del hidrograma. En este caso, la reducción de volumen debe disminuir en comparación con los escenarios 1, 2, 3 y 4, en los cuales se consideró que el flujo subsuperficial quedó retenido en el techo. Para establecer la comparación, se utilizó el techo 1 para un periodo de retorno de 5 años (ver Figura 12)

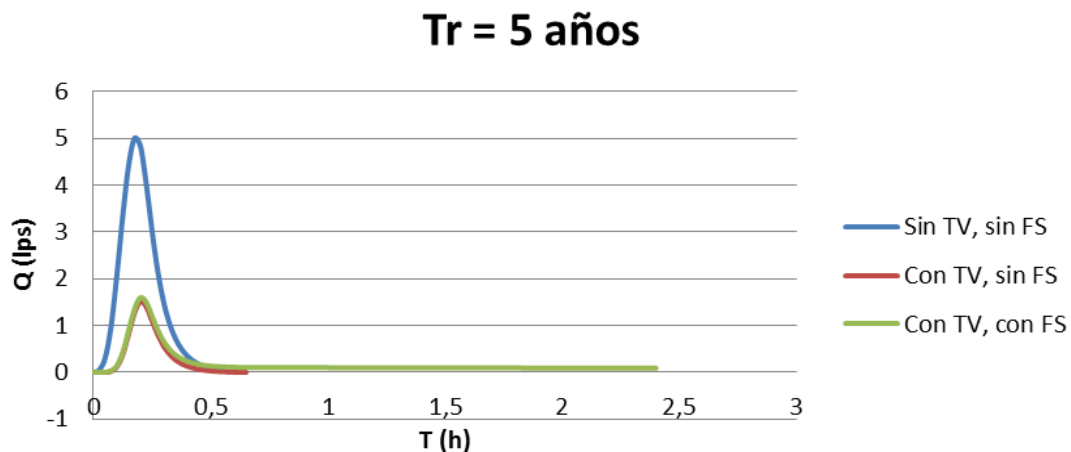


Figura 12. Hidrogramas para techo 1, con período de retorno de 5 años

La influencia del flujo subsuperficial en este caso, es casi despreciable en lo que respecta a caudal pico, ya que el aporte de caudal máximo viene dado con un caudal pico de 1,514 lps a las 0,2 horas, mientras que el caudal pico del flujo subsuperficial es de 0,105 lps a las 0,35 horas. Al sumar ambos hidrogramas se obtiene un caudal pico de 1,598 lps a las 0,2 horas; la diferencia entre considerar o no el flujo subsuperficial se observa en el volumen retenido, que disminuye con respecto a los escenarios del 1 al 4, en los cuales no se transitó el flujo subsuperficial.

Para los casos anteriores, el flujo subsuperficial quedó retenido en el techo, sin embargo, si no se desea retener esta masa de agua, es posible dejarla fluir con tuberías dentro del suelo que permitan este fenómeno, obteniéndose como la Figura 13 en la que los hidrogramas de salida se achatan debido al tránsito de los mismos. Es evidente la reducción del caudal pico y el retardo en el tiempo de generación del mismo. El uso de estructuras de control para retardo del caudal pico tiene un impacto positivo en la reducción del mismo, aun incluyendo el flujo subsuperficial.

Tr = 5 años

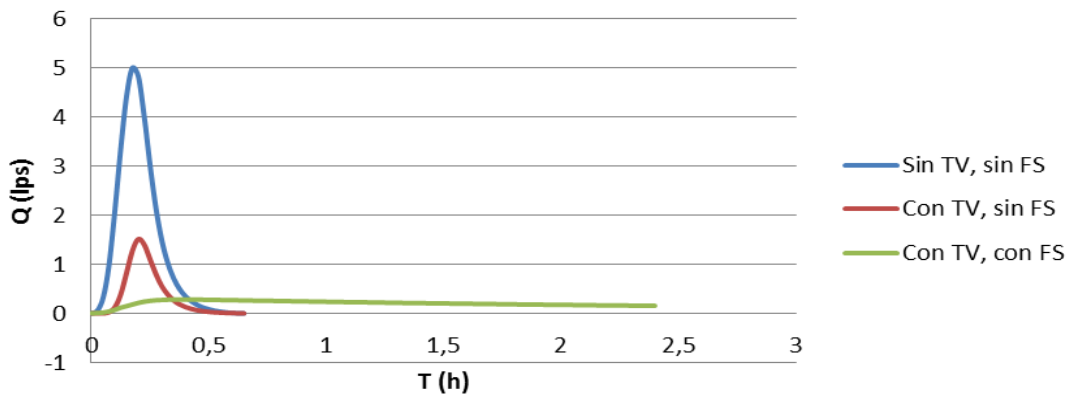


Figura 14. Hidrogramas para techo 1

Hasta ahora, en los escenarios anteriores se ha evaluado el comportamiento de la escorrentía a nivel de techos y parcelas sin incluir el aporte de las calles y áreas verdes del urbanismo. Para esta valoración adicional, se realizaron 6 escenarios (ver Tabla 2), y en cada uno de ellos se calculó el caudal pico del urbanismo y para tener ordenes de magnitud a nivel de diseño, se calculó el diámetro del colector capaz de conducir dicho caudal.

Tabla 2. Escenarios planteados a nivel de urbanismo

Escenario 8:	Se generaron los hidrogramas de las calles considerando techos originales y calles de asfalto.
Escenario 9:	Es similar al escenario 8, con la diferencia de que se tomó en cuenta la influencia de techos verdes.
Escenario 10:	Es similar al escenario 9, solo se anexó tanque de almacenamiento
Escenario 11:	Es similar al escenario 1, solo que se utilizó pavimento permeable
Escenario 12:	Es similar al escenario 9, con la diferencia que se utilizó pavimento permeable.
Escenario 13:	Es similar al escenario 10, con la diferencia que se utilizó pavimento permeable.

Para tener otra idea más clara del impacto producido por estos escenarios, se presenta el diseño de un colector de aguas de lluvia para la calle 1 (ver Figura 14).

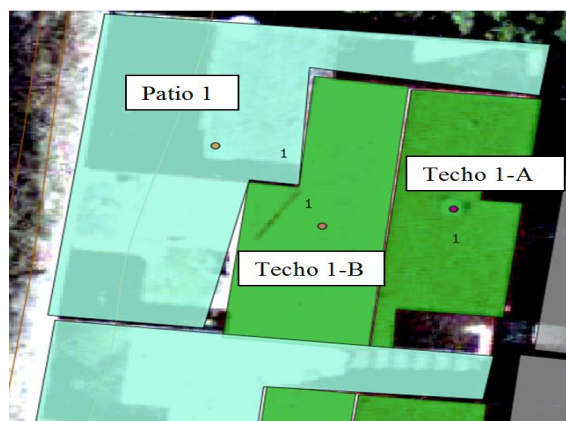


Figura 14. Topología arrojada por la aplicación "TechosVerdes.py"

Asumiendo que estos trabajan a capacidad total, con una pendiente de 0,01 m/m, de material PVC, utilizando la ecuación de Manning (ver Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de la aplicación de la ecuación de Manning.

	Esc 8	Esc 9	Esc 10	Esc 11	Esc 12	Esc 13
Qmax (m³/s)	0,20	0,14	0,11	0,14	0,08	0,05
Diámetro (mm)	396,00	346,00	317,00	342,00	278,00	225,00
Diámetro (pulg)	15,59	13,62	12,48	13,47	10,95	8,86
Diámetro comercial (pulg)	16,00	14,00	14,00	14,00	12,00	10,00

En la Tabla 4 se aprecia la reducción del caudal pico para cada escenario a nivel de urbanismo. Es notable la reducción del caudal pico utilizando cualquier sistema de los estudiados en este trabajo de investigación.

Tabla 4. Reducción del caudal pico para cada escenario a nivel de urbanismo

Escenario	Q max (lps)	Reducción del caudal pico %
8	1171,33	0,00
9	811,19	30,75
10	642,99	45,11
11	798,74	31,81
12	456,20	61,05
13	295,25	74,79

Se observa para el escenario 9, que el uso de techos verdes reduce en un 30,75 % la magnitud del caudal pico que el urbanismo produce, siendo esta una buena opción para retener agua en cada vivienda. Por otro lado, si además de utilizar techos verdes, se adiciona la retención de parte del volumen de agua producido en tanques de almacenamiento (Escenario 10), la reducción del caudal pico se incrementa a 45,11 %, debido al acopio y al retardo que se produce por el tránsito del hidrograma producido que esto implica.

Si se implementa al urbanismo original, un sistema de vialidad que permita mayor infiltración (Escenario 11), se observa una reducción del caudal pico solo a nivel de calle, que según los resultados obtenidos, es equivalente al uso de techos verdes, con un 31,81 % de reducción del caudal pico. Si se utilizan techos verdes y vialidad permeable (Escenario 12), la reducción del caudal pico aumenta a 61,05 %, debido al incremento de la capacidad de infiltración en el urbanismo. Si además de esto, se considera almacenar agua en tanques (Escenario 13), el resultado es una disminución de 74,79 %, debido a la acción combinada de aumento de infiltración y de almacenamiento de agua.

4. CONCLUSIONES

Se demostró que a nivel de drenaje, los caudales pico disminuyen, y por consiguiente, los diámetros de tuberías se reducen, incluyendo volúmenes excavados, dimensiones de cunetas y rejillas, y todo lo que implique el diseño de drenaje urbano, por lo que existiría una compensación monetaria. Por otro lado, el uso de los sistemas de retención de volumen y retardo en la producción de caudales máximos, reduciría en gran medida las inundaciones en las ciudades, permitiendo su crecimiento sin necesidad de generar los problemas de inundaciones y desbordes de quebradas o drenajes.

Ahora bien, a nivel de urbanismo, es probable que la implementación de cualquiera de estos sistemas encarezca el costo de las viviendas, ya que un techo verde por poseer una masa de suelo húmeda o saturada en su condición más desfavorable, incrementaría el peso por metro cuadrado de techo, exigiendo estructuralmente a la vivienda y demandando probablemente mayor calidad o cantidad de materiales que una vivienda común, además de que la implementación del techo puede ser más costosa que un techo convencional. A nivel de ciudad, si cualquiera de estos escenarios se aplica, la estructuras de drenaje urbano podrían ser proyectadas para caudales menores, e incluso, aumentar su vida útil sin necesidad de reponerlas a medida de que la ciudad crezca, controlando la producción de agua a nivel de cada urbanismo, lo que disminuiría los costos de operación y mantenimiento del sistema.

5. REFERENCIAS

- [1] V. T. Chow, D. Maidment y L. Ways, Hidrología Aplicada, Bogotá: McGraw Hill, 1994.
- [2] N. López, Evaluación de la escorrentía en áreas urbanas mediante la implementación de techos verdes, Barquisimeto, 2014.
- [3] G. Minke, Techos verdes, Montevideo: Fin de siglo, 2004.
- [4] J. Mentens, R. Dirk y H. Martin, Green roofs as a tool to solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, vol. I, Leuven: Departmente of Land Management, Laboratory for forest, Nature & Landscape Research, KULeuven Vital Decosterstr., 2005.
- [5] M. Uhl y S. S, Green Roof Storm Water Retention-Monitoring Results, Meunster, 2008.
- [6] C. Lucheng, Hamerschlag Hall Green Roof Storm Water and Runoff Reduction Performance, Pittsburgh, 2011.
- [7] A. Mackay, R. Greswell y J. Sadler, Switch in birmingham, UK: experimental investigation of the ecological and hydrological performance of extensive green roofs, reviews in environmental science and biotechnology, Birmingham, 2009.