

EL EFECTO PANTALLA O SOMBRA DE LOS ÁRBOLES EN LA FORMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS URBANOS

• Pablo César Véliz-Chávez •
Universidad del Valle de México

• Enrique González-Sosa •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

• Sofía del Rocío Barajas-Ortiz •
Universidad del Valle de México

• N. Maricela Ramos-Salinas •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen

La funcionalidad del bosque urbano depende de la intensidad y el ángulo de incidencia de la precipitación, la capacidad de intercepción, la velocidad y dirección del viento, y la ubicación espacial de los árboles. El efecto de pantalla de la vegetación urbana es una condicionante de la generación de los escurrimientos urbanos, de la eficiencia del sistema de drenaje y de los niveles de contaminación ocasionados por el lavado de contaminantes de calles y avenidas. En este trabajo se investiga el efecto de pantalla o sombra en la generación de los escurrimientos urbanos en torno a un árbol aislado de la especie *Ficus benjamina* L. El flujo de intercepción fue medido con base en el sistema desarrollado por Guevara-Escobar *et al.* (2006) construido con plástico transparente; en este caso, el plástico fue sustituido por policarbonato transparente, con el fin de reducir las pérdidas producida por la fuerza y turbulencia del viento. El volumen acumulado en los 88 eventos fue de 21.36 m³ (sin árbol); considerando la pérdida por intercepción, se redujo a 6.97 m³, una diferencia de 14.39 m³. El gasto calculado con la precipitación (P_g) fue de 30.51 m³s⁻¹, el cual se redujo 8.49 m³s⁻¹, al considerar las pérdidas por intercepción. Con la relación propuesta por David *et al.* (2006), las características morfológicas de la especie *Ficus benjamina*, así como su arquitectura, se encontró que la distancia del efecto pantalla llega a ser de 4.43 m. La diferencia entre el gasto originado y la precipitación neta P_n fue de 22.01 m³s⁻¹. Los resultados muestran que la funcionalidad del bosque urbano como estructura de control-obstrucción y su beneficio en la generación de los escurrimientos urbanos depende de su ubicación espacial dentro de una zona urbana.

Palabras clave: efecto pantalla, intercepción, hidrología urbana, escurrimientos urbanos.

Introducción

La falta de valoración de la vegetación urbana y el crecimiento de las ciudades son dos factores fundamentales que deben considerarse en la planeación de los sistemas de drenajes y en los sistemas de desalojo de las aguas urbanas. No obstante que la precipitación determina la

distribución espacial y temporal de la cantidad y calidad de los escurrimientos, en forma individual los árboles urbanos influyen en los procesos hidrológicos urbanos, y tienen un rol significativo en la generación de los escurrimientos, al interceptar, y retener o disminuir el flujo de agua que llega al suelo (Guevara-Escobar *et al.*, 2006). La distribución

y las trayectorias de los caminos que siguen los flujos en calles, avenidas o bien en parques, están determinadas por el nivel de obstrucción y control de los árboles. El análisis por tormenta llevado a cabo en Dayton, Ohio, Estados Unidos, mostró que una cobertura del 22% redujo el escurrimiento potencial en un 7% y que un ligero incremento de la cobertura arbórea (29%) disminuyó el flujo en un 12%. (Sanders, 1986). Físicamente, un árbol presenta una obstrucción que funciona como barrera para aminorar el escurrimiento del lado de sotavento. Empero, la inclinación y dirección de la lluvia determinan el nivel de funcionamiento del árbol como estructura de obstrucción, y delimitan la dirección en la cual influye el árbol; a este efecto, Guevara-Escobar et al. (2006) lo denominaron efecto pantalla. En cuanto al funcionamiento como estructura de control, el dosel de los árboles tiene la capacidad de interceptar el agua de lluvia y retornarla a la atmósfera en forma de vapor, por lo que una fracción de la precipitación nunca llegará a la superficie del suelo (Savenije, 2004; Chappell et al., 2001; Germer et al., 2005). Los beneficios hidrológicos de los árboles urbanos comprenden lo siguiente: reducir la erosión de pavimentos mediante la disminución del impacto de la gota de lluvia, disminuir y retardar la formación del escurrimiento superficial, y aminorar la contaminación a ríos y lagos, además de bajar los costos de tratamiento, ya que un buen porcentaje de contaminantes proviene del lavado de los pavimentos (Xiao et al., 2000). Además, los ingenieros pueden considerar a los árboles urbanos en el diseño de los sistemas de drenaje pluvial (McPherson, 2003) debido a que éstos funcionan como estructuras de retención-retardo del flujo y tiempo de concentración del gasto pico, en beneficio de una mejor eficiencia de los sistemas de drenaje (Krishnamurthy y Rente-Nascimento, 1998). La comprensión de la magnitud de la interceptación de precipitación, y el efecto pantalla o sombra es esencial para la caracterización de la humedad del suelo, erosión, formación de escurrimientos superficial,

concentración y distribución de contaminantes (Nowak y Dwyer, 2000). Los beneficios de la interceptación se reflejan en la formación del escurrimiento superficial; por ejemplo, se evitó la formación de un millón de metros cúbicos gracias a la interceptación de lluvia, lo que permitió un ahorro de 710 millones de dólares (Saxon, 1999). McPherson et al. (2006) indicaron que en una simulación en árboles urbanos, el escurrimiento superficial disminuyó del 2 al 7%. Así que los árboles pueden ser vistos como una nueva ingeniería tecnológica "Bioretainment" (en inglés) debido a que tienen la capacidad de retener el agua de lluvia interceptada (Xiao y McPherson, 2002). Los factores que otorgan un buen funcionamiento de ingeniería hidráulica-urbana apoyada en los árboles son su arquitectura y las condiciones hidrometeorológicas del sitio de estudio (Rutter et al., 1971; Gash, 1979; McPherson, 2003). En una investigación realizada en Sacramento, California, Estados Unidos, la interceptación varió en un rango de 18 a 36% de la precipitación (Xiao et al., 1998). En árboles aislados, Xiao et al. (2000) determinaron que el 15 y 27% de la precipitación fue interceptada por un árbol *Pyrus calleryana* y *Quercus suber*, respectivamente. Mientras que en árboles individuales caducifolios, la interceptación fue de 2 273 litros a 3 455 litros por año; en árboles aislados siempre verdes, ésta fue de 18 184 litros por año (Urban Watershed Forest Manual, 2005). Guevara-Escobar et al. (2006) encontraron para la especie *Ficus benjamina* que la interceptación resultó del 59.5% de la precipitación, también señalaron la importancia de investigar el efecto pantalla o sombra en la formación de los escurrimientos. En las últimas décadas en particular, el acelerado desarrollo industrial y poblacional, e insostenible crecimiento de las ciudades, entre ellas Querétaro, México, ha provocado modificaciones significativas en los usos del suelo y un crecimiento importante de la superficie impermeable por la creación y ampliación de calles y avenidas. Este hecho trajo la necesidad de construir nuevos espacios con vegetación para camellones, jardines y

parques, afectando los procesos hidrológicos de los escurrimientos urbanos. Además, los árboles en la zona urbana de Querétaro no tienen bien definida la configuración espacial y por especie debido a la falta al desconocimiento de su funcionalidad hidrológica.

Objetivo

El objetivo de esta investigación fue analizar el efecto pantalla o sombra en la generación de los escurrimientos, a partir de la intercepción de un árbol aislado de la especie *Ficus benjamina*. En particular se evaluó el efecto pantalla través del gasto pico aplicando el método racional (CIA), considerando al árbol como estructura de retardo y estableciendo su importancia como elemento regulador de los escurrimientos urbanos.

Materiales y métodos

La investigación se llevó acabo en la ciudad de Santiago de Querétaro. La ciudad es la capital del estado de Querétaro, México, y se ubica a 250 kilómetros en dirección noroeste de la capital del país. La ciudad se localiza en las coordenadas 20° 30' y 100° 23' de latitud (norte) y longitud (oeste), respectivamente. La elevación sobre el nivel del mar es de 1 820 m. La población de la zona urbana es de 743 139 habitantes, resultando una densidad promedio de 62 hakm². La zona urbana forma parte del corredor continental del altiplano de México, entre el Golfo de México y la cuenca del Pacífico. Por su ubicación geográfica, las precipitaciones generalmente son de origen convectivo. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua), la precipitación media anual es de 548 mm, con una mínima y máxima de 274 y 999.2 mm, respectivamente. Los vientos dominantes son en dirección este y noreste, con una velocidad promedio de 1.7 ms⁻¹. La temperatura promedio anual es de 18.7 °C, con una mínima de 17.4 °C y una temperatura máxima de 19.7 °C. La evaporación potencial promedio anual varía en el rango de 2 020 a 2 200 mm.

Sitio experimental

La investigación se hizo en un árbol aislado de la especie *Ficus benjamina* L. El árbol seleccionado tenía una edad de 15 años (2005) y se ubica en la Universidad Autónoma de Querétaro (20° 35.44' N y 100° 24.79' W, 1 819 m de elevación). En abril de 2005, el tronco del árbol tenía una altura de 1.10 m de altura, con un diámetro de 22.44 cm, el diámetro de la corona de 6.00 m con una altura total de 5.70 m. En enero de 2006, el tronco del árbol tenía 1.10 m de altura y 25.0 cm de diámetro; la medida de la corona y altura total del árbol fueron de 6.18 y 6.00 m, respectivamente. En marzo de 2007, la altura del tronco pasó a 1.18 m, con un diámetro de 30.00 cm; la corona y altura total fueron de 6.55 y 7.40 m, respectivamente. El árbol *Ficus benjamina* L. estaba rodeado por edificios, separados a partir del tronco, por una distancia de entre 13.0 y 100.0 m. El edificio más cercano se localizó en el lado este del árbol, con una altura de 2.80 m. La topografía es relativamente plana y la superficie está pavimentada con asfalto (Guevara-Escobar et al., 2006).

Datos meteorológicos

La estación meteorológica se ubicó en el sector sur-este, a una distancia de 100 m del árbol. Se registró temperatura, velocidad y dirección del viento cada cinco minutos. La precipitación también se registró cada cinco minutos mediante un pluviómetro de tipo TE5LL-L.

Flujo de traslocación

El flujo de traslocación (T_H) se midió en 2005 mediante el sistema de captación diseñado por Guevara-Escobar et al. (2006). En 2006, se modificó el sistema de captación para incrementar su *performance*. El sistema original, constituido por láminas de polietileno, se cambió por láminas de policarbonato transparente. El nuevo sistema de captación cubrió una superficie de 28.27 m². Las láminas fueron soportadas por una estructura de madera con

45% de pendiente dirigida hacia el tronco. Las canaletas de concentración del flujo de traslocación se construyeron con tubos de PVC (2% de pendiente), los cuales conducen el agua de lluvia hacia un recipiente (200 l). Mediante una báscula (60 kg de capacidad y de 2 g de aproximación), se registraron de forma sistemática los cambios de flujo de traslocación. La báscula enviaba una señal a una máquina registradora de peso de manera automática y ésta transmitía los cambios del peso a una computadora. La computadora guardaba la información cada minuto. La computadora y la báscula se ubicaron a una distancia de 30.00 m del árbol. Asimismo, el dispositivo de medición contó con una pequeña pantalla de policarbonato y con una altura de 0.50 m para evitar las entradas laterales de precipitación ocasionadas por los efectos locales de turbulencia. La pantalla se instaló alrededor del perímetro de la corona del árbol durante los tres años que duró el experimento.

Flujo cortical

El flujo cortical se captó mediante una canaletita puesta en el tronco del árbol en una vuelta y media; ésta fue fabricada con un manguera

de plástico flexible de 2.54 cm de diámetro. Para colocar la canaletita en el troco se retiraron 5 mm de corteza del tronco para adherir la canaletita; posteriormente la canaletita fue unida al tronco con grapas y silicón; todo esto con el fin de evitar fugas. Por último, la canaletita drenó hacia un recipiente de 20 l. El agua acumulada en el recipiente era cuantificada al final de cada evento de lluvia (figura 1).

Efecto pantalla

Para evaluar el efecto pantalla del árbol en la generación de los escurrimientos, se midió la distribución espacial de la precipitación alrededor del dosel del árbol; se colocaron 16 recipientes de forma cilíndrica en las direcciones norte, sur, este, oeste, noreste, noroeste, sureste, suroeste. Esta metodología es descrita por Guevara-Escobar *et al.* (2006).

Teoría

Intercepción de precipitación

El balance de agua en la cubierta de un árbol se puede considerar como un sistema; una entrada y una salida que están conectados por

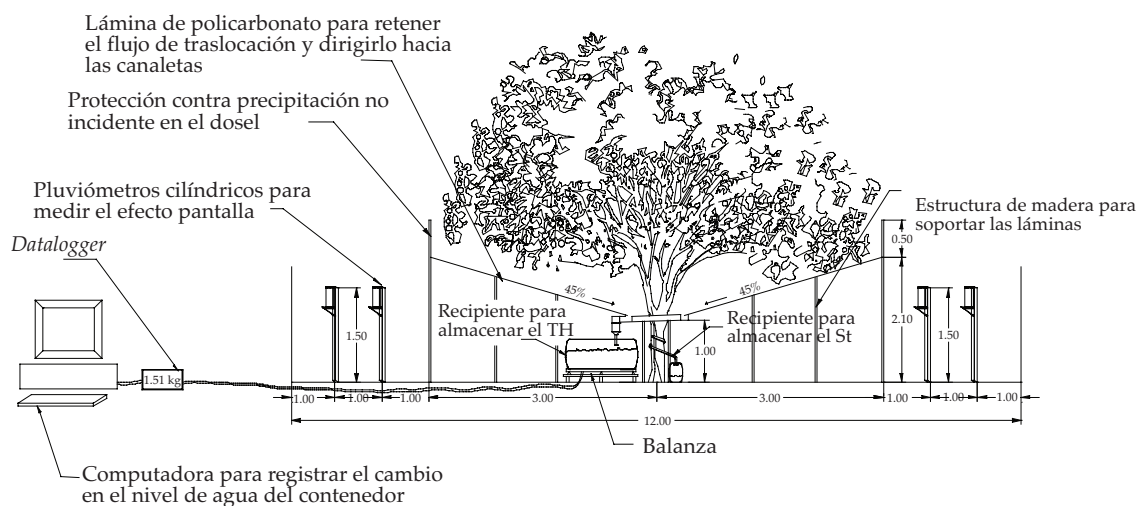


Figura 1. Esquema del sistema de medición para la intercepción de precipitación.

una condición de transferencia interna que tiende a modificar los componentes de salida (Keim y Skaugset, 2003). La intercepción o pérdidas por intercepción corresponden a la diferencia de la precipitación (P_g) y la precipitación neta (P_n) que llega al suelo, la cual integra el flujo por goteo, caída libre sin tocar el follaje y el flujo que escurre por el tronco (P_n), siendo el residuo las pérdidas por evaporación (E); por lo tanto, conocidos la entrada (P_g) y la salida (P_n), al considerar el árbol como un sistema, es posible determinar la transferencia del sistema y las pérdidas por intercepción. El sistema podrá considerarse lineal cuando la entrada y la salida sean directamente proporcionales. Empero, en el proceso de intercepción de lluvia, la entrada y la salida son función del tiempo y transformaciones internas del sistema. En este contexto, en el modelo de base física propuesto por Rutter *et al.* (1971), el cambio de almacenamiento de agua de lluvia en el dosel por unidad de tiempo y durante el evento se expresa con la ecuación:

$$dC = (P_g - T_H - S_t - E)dt \quad (1)$$

Los términos T_H y S_t corresponden a los flujos de traslocación y cortical. El primero indica el agua de lluvia que pasa entre el follaje del árbol y el segundo a la precipitación que desciende a través del tronco del árbol; ambos términos finalizan en la superficie del suelo y su sumatoria representa la precipitación neta (P_n).

Efecto pantalla

La intercepción de precipitación por el follaje tiene gran influencia en la distribución espacial de los escurrimientos superficiales (David *et al.*, 2006). Durante un evento, la precipitación desciende con cierto grado de inclinación, por lo que el árbol puede trabajar como una estructura de control y obstrucción. En cuanto a estructura de control, ésta se determina mediante la intercepción horizontal

ocasionada por el ángulo de incidencia de la lluvia. En la estructura de obstrucción, el ángulo de incidencia de la precipitación sobre el dosel aminora la cantidad de lluvia al lado de sotavento. A este fenómeno, Guevara-Escobar *et al.* (2006) lo denominaron efecto pantalla e indicaron tres zonas de influencia de la precipitación. La primera corresponde a la zona de barlovento, que es donde el árbol no interfiere en la precipitación; la segunda zona es donde se presenta la intercepción de precipitación; por último está la zona de sotavento, en donde el árbol disminuye la cantidad de precipitación hacia dicha zona. Como lo refieren en su trabajo David *et al.* (2006), el ángulo de inclinación de la precipitación (figura 2a) y la altura del árbol son los componentes que determinan la longitud del efecto pantalla (EP). Para determinar el ángulo de inclinación de la precipitación, las ecuaciones empíricas son:

$$\phi = 2.23(0.03937i)^{0.182} \quad (2)$$

$$u_r = 3.378(\ln \phi) + 4.213 \quad (3)$$

$$\tan \alpha = \frac{u_w}{u_r} \quad (4)$$

donde:

- ϕ = diámetro promedio de la gota de lluvia (mm).
- i = intensidad de lluvia (mm h^{-1}).
- u_r = velocidad terminal de la gota de lluvia (mm s^{-1}).
- α = ángulo de inclinación de la precipitación (grados).
- u_w = velocidad del viento (mm s^{-1}).

La cobertura del efecto pantalla depende del ángulo de inclinación de la precipitación (α) y la altura del árbol (h) (figura 2b), y se puede determinar con la expresión:

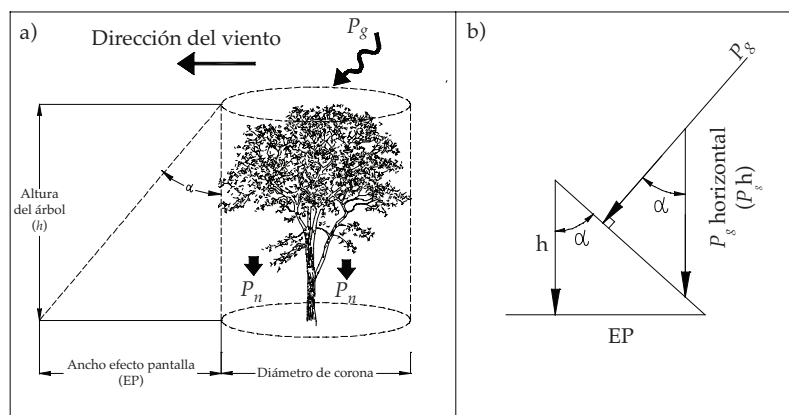


Figura 2. Esquema de influencia del árbol en la distribución espacial de la precipitación: a) dirección de la precipitación y su efecto al lado de sotavento; b) diagrama de cuerpo libre de la inclinación de la precipitación, altura del árbol (h) y distancia del efecto pantalla (EP).

$$EP = h \tan \alpha \quad (5)$$

$$Q = \frac{(C_i A) + (C_{i_l} A) + (C_{i_s} A)}{360} \quad (9)$$

Gasto

Se usó la ecuación del Método Racional (CIA) para cuantificar el gasto pico generado por cada evento de precipitación. La intensidad de precipitación es afectada por la intercepción de lluvia y el efecto pantalla de la forma siguiente:

$$i_l = i(k_l) \quad (6)$$

$$k_l = (P_n / P_g) \quad (7)$$

$$i_s = i(k_s) \quad (8)$$

Siendo la intensidad de lluvia i_l afectada por el factor (k_l), el cual es la relación entre la precipitación cuantificada bajo el dosel (P_n) y precipitación sobre el dosel (P_g). El último coeficiente (K_s) es el parámetro obtenido por Guevara-Escobar *et al.* (2006) (18.7%), por el efecto de pantalla, y que se considerará para los cálculos realizados en esta investigación. Así, el gasto pico por evento se determinó con la siguiente ecuación:

La ecuación (9) puede escribirse como:

$$Q = \frac{CA(i + i_l + i_s)}{360} \quad (10)$$

donde i es la intensidad en sotavento; I , la intensidad sobre la proyección horizontal del follaje, e i_s es la intensidad en la zona de pantalla; el término C es el coeficiente de escorrentía y A es el área correspondiente a la proyección horizontal del follaje. En la presente investigación, el término C será igual a 0.80, que corresponde a pavimentos.

Resultados

Precipitación y condiciones meteorológicas

Los eventos de precipitación utilizados para el estudio fueron los ocurridos durante los años 2005, 2006 y 2007. En el año 2005, entre los meses de julio y octubre, acontecieron 17 eventos en verano y dos eventos en otoño. En el 2006, se presentaron 18 en primavera, 16 en verano y 4 en otoño. Los eventos del

2007 fueron 9 en primavera y 22 en verano. Generalmente los eventos ocurrieron entre las 18:00 y 24:00 h, con una duración promedio de 85 min. El total de precipitación medida en el sitio de estudio fue de 151, 358 y 274 mm para 2005, 2006 y 2007, respectivamente. Durante el año 2005, la intensidad de lluvia varió entre 1.30 y 16.74 mmh⁻¹. La intensidad de precipitación registrada en 2006 fue de 0.22 a 24 mmh⁻¹. En el 2007, la intensidad estuvo comprendida entre 0.84 mmh⁻¹ y 16.40 mmh⁻¹. En la figura 3 se muestra la distribución de los eventos de precipitación, así como la repartición de la lluvia total, intercepción y la parte correspondiente al flujo de traslocación. El tiempo promedio entre el término e inicio del siguiente evento osciló entre 8 horas y 14 días, considerándose tiempo suficiente como para el secado de la cubierta vegetal entre eventos. El cuadro 1 muestra los resultados de precipitación y

condiciones meteorológicas medidos durante los tres años del estudio. De acuerdo con las condiciones meteorológicas, la humedad relativa fue significativamente baja al inicio de cada evento. La máxima velocidad del viento durante los eventos de precipitación varió de 2.41, 3.92 y 4.69 ms⁻¹ en 2005, 2006 y 2007, respectivamente. Es importante hacer notar que se observó una elevada temperatura al inicio de la mayoría de los eventos, lo que propició un incremento significativo de la humedad; así que una humedad baja y temperatura alta favorecieron una tasa elevada de evaporación o pérdidas por intercepción durante la precipitación.

Flujo de traslocación y cortical

El flujo total de traslocación (T_H) resultó de 56.99 mm (2005), 83.97 mm (2006) y 105.49 mm (2007). El flujo promedio fue de 3 mm en 2005,

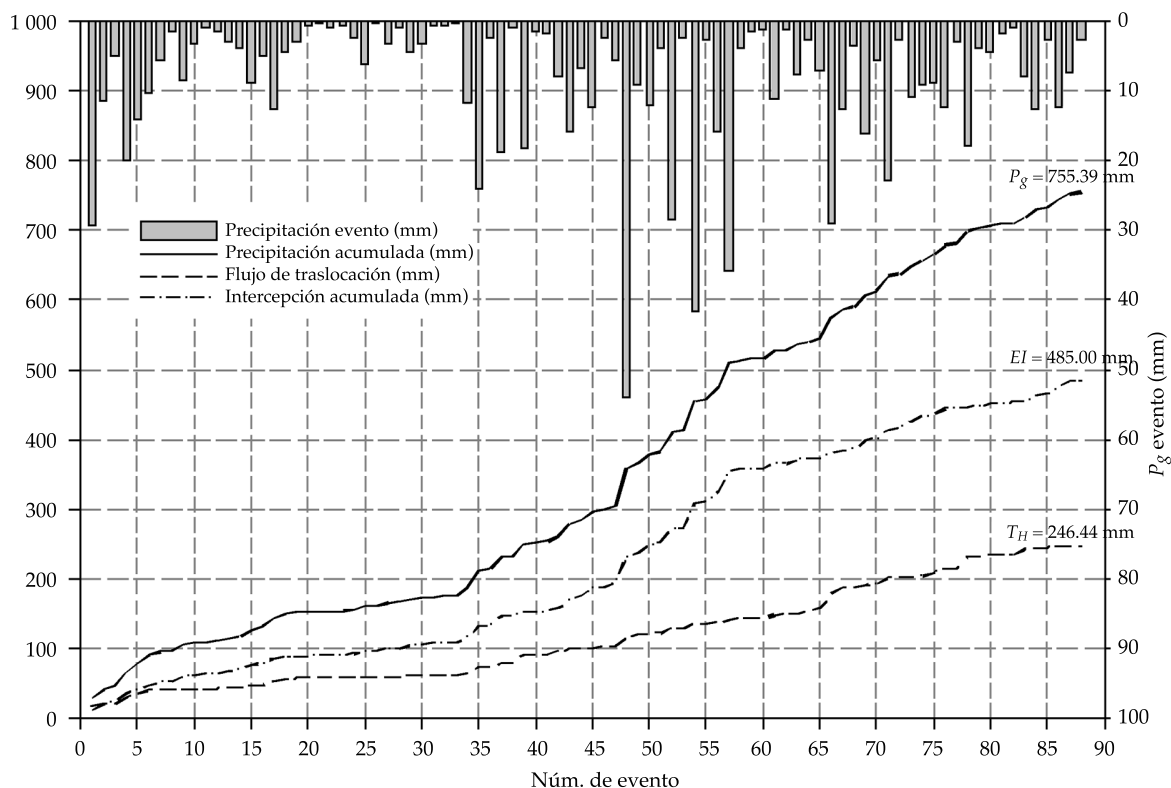


Figura 3. Dinámica de la precipitación e intercepción de lluvia.

Cuadro 1. Características de la precipitación y clima en 2005, 2006 y 2007.

Variable	2005	2006	2007
Total de eventos	19	38	31
Precipitación total (mm)	151.34	358.35	245.7
Intensidad de la precipitación (mm h ⁻¹)			
Máxima	16.74	24.04	16.40
Mínima	1.30	0.22	0.84
Promedio	6.87	4.90	5.48
Duración del evento (min)			
Máxima	200	295	470
Mínimo	5	5	10
Promedio	85	92	110
Humedad relativa (%)			
Máxima	78.97	88.90	96.00
Mínima	48.17	17.20	0.44
Promedio	68.36	64.30	76.22
Temperatura (°C)			
Máxima	21.30	29.25	26.13
Mínima	13.44	11.00	15.38
Promedio	16.76	17.18	18.44
Evaporación (mm)			
Máxima	0.871	1.314	2.863
Mínima	0.011	0.007	0.021
Promedio	0.304	0.223	0.312
Velocidad del viento (m s ⁻¹)			
Máxima	2.41	3.96	4.69
Mínima	0.01	0.00	0.52
Promedio	0.53	1.17	2.27

2.21 mm en 2006 y de 3.40 mm en 2007. El flujo cortical (S_i) representó el 2% de la precipitación total para los tres años. La suma del flujo de traslocación y flujo cortical correspondió a la precipitación neta (P_n), cantidad de agua de lluvia que llega a la superficie del suelo.

Pérdidas por intercepción de precipitación

Las pérdidas por intercepción fueron determinadas a partir de la diferencia entre la precipitación sobre el dosel (P_g) y preci-

pitación neta (P_n) (figura 2). El total de intercepción para cada año en proporción con la precipitación anual fue de 88.57 mm (58.53% de P_g ; Guevara-Escobar et al., 2006), 265.90 mm (74-20% de P_g) y 130.53 mm (53.13% de P_g). La intercepción de precipitación por el *Ficus benjamina* resultó elevada debido a las altas temperaturas y baja humedad relativa al inicio de cada evento, lo que ocasionó una alta evaporación al inicio del evento, misma que también está asociada con la intensidad y duración de los eventos.

Distancia del efecto pantalla

La distancia del efecto pantalla (EP) es función del ángulo de incidencia, de la intensidad de precipitación y de la velocidad del viento (David *et al.*, 2006). El EP que el árbol *Ficus benjamina* produjo del lado de sotavento estuvo comprendido en un rango de 0.37 a 4.43 m; con ángulos de incidencia máximo y mínimo de 3.58° y 36.36° (cuadro 3). Cuando el ángulo de incidencia fue menor a 5°, el árbol no afectó al lado de sotavento durante un evento de lluvia. La cobertura de la distancia del efecto pantalla se incrementa rápidamente cuando el ángulo de incidencia de la precipitación es mayor a 15°.

Volumen del escurrimiento debajo del árbol

Considerando la superficie ocupada por el árbol y la proyección horizontal de follaje, el volumen de agua acumulado en los 88 eventos de lluvia resultó de 21.36 m³ (sin árbol). Teniendo en cuenta la pérdida por intercepción, el volumen de agua de lluvia bajo el árbol se reduce a 6.97 m³. Es decir, existe una baja del escurrimiento debido a las pérdidas por intercepción igual a 14.39 m³, equivalente al 67% del escurrimiento sin árbol. Por otra parte, el volumen promedio de agua de lluvia que no llega a la dirección del lado de sotavento (EP) fue de 0.84 m³ (4%).

En general, el árbol impidió que 15.23 m³ de agua de lluvia llegaran a la superficie del suelo y formaran parte del escurrimiento superficial que drena al sistema de alcantarillado. El cuadro 2 muestra el volumen de agua de lluvia formado en el área del efecto pantalla de acuerdo con la inclinación del ángulo de incidencia e intensidad de la precipitación; en promedio, el árbol evita que 0.10 m³ no formen parte del escurrimiento superficial. El cuadro 4 muestra los gastos obtenidos mediante el método racional y la clasificación de la intensidad y precipitación. En los 88 eventos, el gasto calculado con la precipitación (P_g) fue de 30.51 m³s⁻¹; variando en un rango de 0.13 a 13.91 m³s⁻¹. Considerando la pérdida por intercepción del dosel del árbol, el gasto total fue de 8.49 m³s⁻¹. Es decir, la diferencia entre el gasto originado por P_g y P_n fue de 22.01 m³s⁻¹. Con la presencia del árbol, la formación del gasto inicia a partir de intensidades mayores a 1 mm h⁻¹, porque el dosel del árbol impide la formación del escurrimiento superficial debido a que intercepta el 100% de la precipitación. En los eventos con intensidades mayores a 10 mm h⁻¹, el gasto disminuye en promedio 22%. En este sentido, el comportamiento es semejante al indicado por Xiao *et al.* (2000) y Chair (2002). Los beneficios de la intercepción son mayores en eventos de baja intensidad y larga duración, no así en eventos de alta

Cuadro 2. Volumen de agua de lluvia generado al lado de sotavento de acuerdo con el ángulo de incidencia.

Ángulo de incidencia (grados)	Intensidad promedio (mm h ⁻¹)	Ancho EP (m)	Volumen del escurrimiento		
			Sin árbol (m ³)	Con árbol (m ³)	Diferencia (m ³)
≤ 5	5.36	0.25	0.36	0.07	0.29
≤ 10	7.81	0.72	0.69	0.13	0.56
≤ 15	3.82	1.38	0.72	0.13	0.58
≤ 20	4.37	1.74	0.55	0.10	0.45
≤ 25	5.29	2.53	0.81	0.15	0.66
≤ 30	5.92	3.11	0.56	0.10	0.45
≤ 35	5.34	3.85	0.56	0.11	0.46
≤ 40	4.23	4.53	0.25	0.05	0.20
α > 40	0.63	5.05	0.00	0.00	0.00

Cuadro 3. Distancia del efecto pantalla en relación con el ángulo de incidencia de la precipitación y velocidad del viento.

Rangos de velocidad del viento (m s ⁻¹)	Intensidad promedio (mm h ⁻¹)	Ángulo de la precipitación (grados)	Distancia efecto pantalla (m)
≤ 1	6.04	3.58	0.37
≤ 2	4.07	14.34	1.54
≤ 3	4.51	24.55	2.75
≤ 4	5.87	32.21	3.81
> 4	6.28	36.36	4.43

Cuadro 4. Características del gasto de acuerdo con la intensidad e intercepción de precipitación.

Intensidad	P_g (mm)	Gasto (m ³ s ⁻¹)		
		P_g	P_n	EP
≤ 1	0.82	0.13	0.00	0.03
≤ 5	5.48	7.37	1.83	1.38
≤ 10	12.40	13.91	4.55	2.60
≤ 15	11.55	4.55	1.01	0.85
> 15	18.57	4.55	1.09	0.85
Total		30.51	8.49	5.71

intensidad, ya que éstos exceden la capacidad de almacenamiento en menor tiempo. Además, este tipo de eventos son la principal fuente de contaminantes, ya que lavan o arrastran los aceites que se encuentran en los pavimentos (McPherson, 2003). La solución a este problema es mediante la cubierta vegetal de los árboles, es decir, a través de la intercepción o retención de precipitación, ya que de acuerdo con los resultados obtenidos, el gasto generado es menor en eventos de baja intensidad. Por último, el gasto obtenido por el efecto pantalla fue de 5.71 m³s⁻¹.

Discusión

Las características de la precipitación y dirección del viento, así como la ubicación de los árboles son factores que determinan su buen funcionamiento desde el punto de vista hidrológico, sobre todo porque la intercepción regula los escurrimientos. En zonas urbanas, además, el efecto pantalla o sombra es importante, pues determina los caminos de los

escurrimientos en torno a los árboles. Cuando la precipitación es interceptada por el dosel del árbol, con el máximo ángulo de incidencia (36.36°), calculado con la ecuación (4) y las características morfológicas de la especie *Ficus benjamina*, así como su arquitectura, se tiene que la distancia del efecto pantalla llega a ser de 4.43 m. Es importante destacar que la distancia del efecto pantalla puede aumentar en función de la altura del árbol y la intensidad de la lluvia. A raíz de los resultados es posible establecer una serie de configuraciones de la distribución y ubicación de la vegetación urbana, sin olvidar que la magnitud del EP depende del dosel y la especie del árbol para definir el camino y la magnitud de los escurrimientos de su entorno. Es decir, que dos árboles con la misma altura, pero diferente especie tendrían efectos distintos. El efecto de pantalla con una configuración espacial de la vegetación compuesta por una sucesión de árboles de diferente tamaño y especie también tendría un comportamiento disímil, en comparación con el de un árbol aislado. Por ejemplo, si la altura del

árbol -1 es mayor a la altura del árbol -2 y éstos se encuentran separados a una distancia menor a la del efecto pantalla, la cubierta vegetal del árbol -2 probablemente no sea saturada en su totalidad debido a que el árbol -1 impedirá el paso de la precipitación hacia el follaje del segundo árbol (figura 4a). En caso de que el ángulo de la precipitación sea menor de 5° , la distancia del efecto pantalla será nula y cada árbol interceptará la precipitación de acuerdo con su arquitectura (figura 4b). La figura 4c muestra el caso de dos árboles cuya cubierta vegetal se traslapa; la composición entrelazada de ambos follajes intercepta mayor cantidad de agua de lluvia debido a que el porcentaje de traslocación libre se reduce. O bien, cierto porcentaje del follaje entretejido podría no llegar a ser humedecida a consecuencia del efecto pantalla que origina el árbol -1 y se aumentaría la magnitud del efecto pantalla. Otro caso común es el de una calle con árboles ubicados en el camellón central de una avenida o bien sobre las bordes de las calles con sus cubiertas traslapándose (figura 4d); el beneficio al lado de sotavento es linealmente proporcional a la suma del efecto por el número de árboles. La figura 5 muestra el comportamiento de los volúmenes del escurrimiento que se generan en los sectores de sotavento y barlovento. Puede observarse que los escurrimientos siguen una correlación lineal a la cantidad de árboles, considerando que son de la misma especie y arquitectura. La figura 6a muestra los casos de dos posiciones diferentes de los árboles; en el primero se ilustra una edificación que tiene menor altura que el árbol y en el segundo la situación contraria a la enunciada anteriormente. En ambas posiciones, toda la cubierta vegetal trabajará como estructura retención-retardo; sin embargo, el árbol en la primera posición disminuye el volumen de agua de lluvia acumulado sobre el suelo y el árbol en la segunda posición protege de la lluvia a la fachada del edificio que está al lado de sotavento de la precipitación, disminuyendo los problemas de humedecimiento del muro y las infiltraciones laterales que afectan a la

edificación. Considerando el sentido de la precipitación del lado barlovento del edificio (figura 6b), la cubierta vegetal del árbol podría no interceptar el agua de lluvia tomando en cuenta el ángulo de incidencia obtenido en el presente trabajo. En cuanto al efecto pantalla, éste podría ser originado por la edificación y no por el árbol. Finalmente, en las avenidas con árboles ubicados en los camellones y aceras cercanas (figura 6c) a las edificaciones, su funcionalidad será una combinación de lo descrito con anterioridad. La funcionalidad de la vegetación urbana aún es más importante con base en la teoría lineal y bajo el supuesto de una dominancia de la especie *Ficus benjamina*, en el sector de tratamiento para reúso del agua. Por cada cien árboles con las condiciones fenológicas del árbol aislado considerado en el estudio, el volumen del escurrimiento generado sin árbol, de $2\,136\text{ m}^3$, pasaría a sólo 697 m^3 , lo cual implica un ahorro por tratamiento de aguas urbanas, a un costo de \$3.00 pesos m^{-3} , de \$4 317.00. Costo independiente de los beneficios por ahorro de energía, regulación de clima, reducción de la contaminación y el bienestar social del bosque urbano.

Conclusiones

La distribución espacial de la vegetación urbana es una componente importante en los procesos hidrológicos, hidráulicos y de calidad del agua de las grandes ciudades. No obstante que en las últimas décadas la combinación de los modelos distribuidos y los de base física apoyan el estudio y un mayor conocimiento de los procesos hidrológicos urbanos, aún se requiere estudiar algunos procesos, como es el caso del efecto de pantalla de los árboles. Debido a que la vegetación urbana no está ubicada en forma funcional para mejorar la eficiencia de los sistemas de drenaje y de los sistemas de desalojo de las aguas urbanas, con la presencia del árbol *Ficus benjamina* la formación del gasto inicia a partir de intensidades mayores a 1 mm h^{-1} , porque el dosel del árbol impide la formación del escurrimiento superficial debido

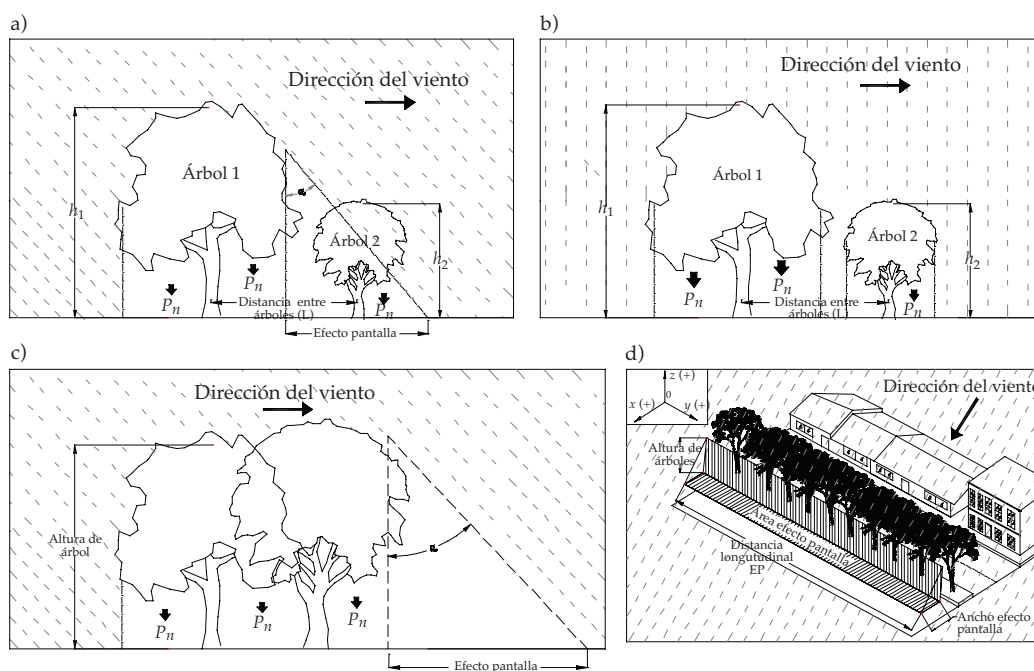


Figura 4. Efectos del árbol de acuerdo con su posición e inclinación de la precipitación:

- a) árbol -2 con altura menor al árbol -1 y ubicado al lado de sotavento, su cubierta vegetal no será saturada al 100%;
- b) árboles con altura distinta y con precipitación horizontal; c) árboles de igual tamaño y cubierta vegetal traslapadas, y d) línea de árboles en camellón central de una calle urbana.

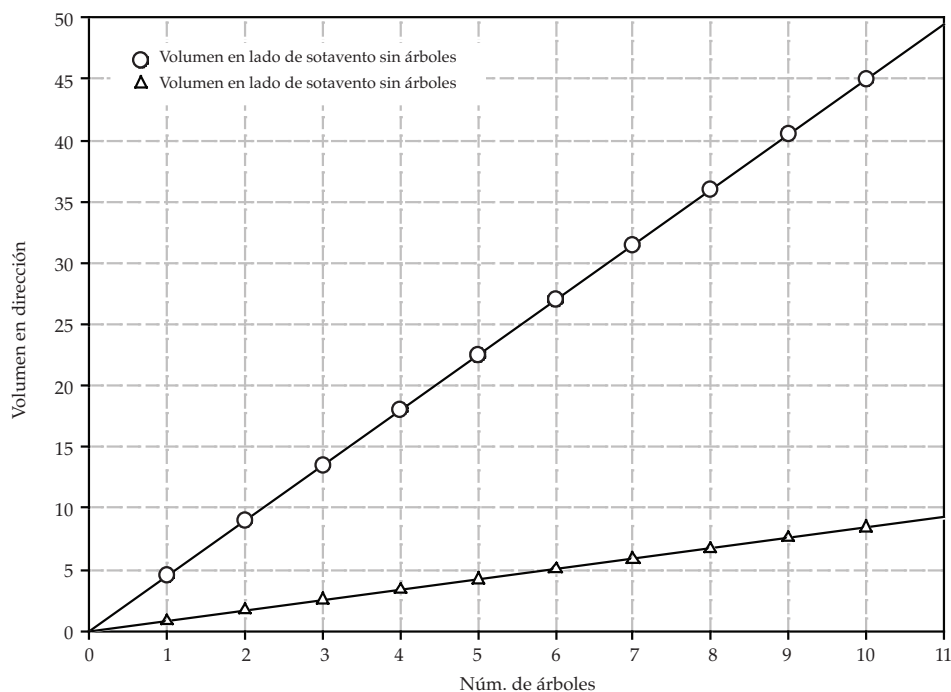


Figura 5. Volumen generado en dirección de sotavento de acuerdo con la cantidad de árboles. Los círculos corresponden al volumen sin considerar el efecto pantalla y los triángulos al volumen considerando el efecto pantalla.

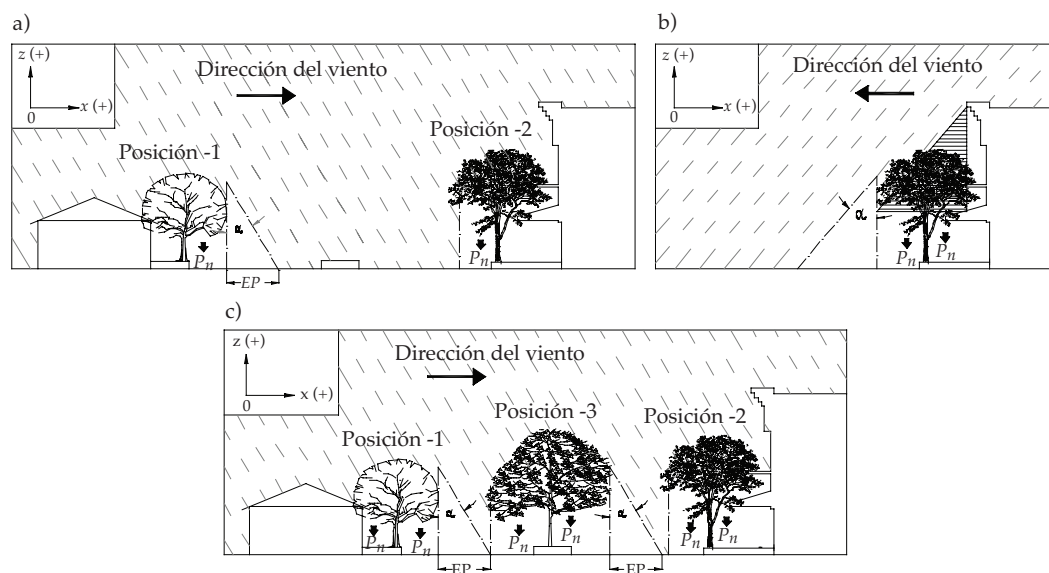


Figura 6. Efectos del árbol de acuerdo con su distribución espacial en una calle urbana: a) árboles en las aceras cercanas a las edificaciones; b) árbol ubicado al lado de un edificio de mayor altura que el árbol; c) árboles en las aceras y el camellón de una calle.

a que intercepta el 100% de la precipitación. En los eventos con intensidades mayores a 10 mm h^{-1} , el gasto disminuye en promedio 22%. Además del funcionamiento de un árbol como estructura de control en la formación de volúmenes de agua de lluvia bajo el dosel del árbol y como estructura de obstrucción alrededor de su cubierta vegetal, es importante para regular y retardar la formación del gasto y los tiempos de concentración de los gastos picos que van hacia los sistemas de drenaje urbano; se observa que también es relevante el efecto pantalla, porque reduce los escurrimientos del lado de sotavento y reduce los daños a las edificaciones por humedad e infiltraciones laterales no deseadas o poco veces consideradas en el diseño de las edificaciones, viviendas e infraestructura urbana. El EP que el árbol *Ficus benjamina* produjo del lado de sotavento estuvo comprendido en un rango de 0.37 a 4.43 m, con ángulos de incidencia máximo y mínimo de 3.58° y 36.36° . Además, el efecto de pantalla puede ampliarse al establecer una sucesión

de árboles bajo esquemas entrelazados o bien bajo esquemas análogos al de un paraguas, al ir colocando árboles de mayor a menor tamaño, incrementado con ello el efecto de pantalla, lo cual depende del ángulo de incidencia de la precipitación y de la fenología de la especie investigada. Del mismo modo, la distancia obtenida del efecto pantalla es un indicativo para determinar la separación entre los árboles urbanos y su plantación respecto a las edificaciones, de manera que permita una funcionalidad correcta de la vegetación urbana. La funcionalidad de la vegetación urbana a partir del estudio de árboles aislados y bajo la hipótesis de la linealidad de la interceptación y el efecto pantalla muestra la importancia que ésta tiene en la formación y regulación de los escurrimientos urbanos, la eficiencia de los sistemas de alcantarillado y de los niveles de contaminación por lavado de calles y avenidas; tales beneficios se reflejan en un ahorro en los costos de tratamientos, así como en la reducción de daños en edificaciones por humedad e infiltraciones laterales.

Recibido: 17/01/12

Aceptado: 10/05/12

Referencias

- CHAPPELL, N.A., BIDIN, K., and TYCH, W. Modelling rainfall and canopy controls on net-precipitation beneath selectively-logged tropical forest. *Plant Ecology*. Vol. 153, 2001, pp. 215-229.
- DAVID, T.S., GASH, J.H.S., VALENTE, F. PERREIRA, J.S., and FERREIRA, M. Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrol. Process*. Vol. 20, 2006, pp. 2713-2726.
- GASH, J.H.S. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Vol. 105, 1979, pp. 43-45.
- GERMER, S., ELSEMBER, H., and MORAES, J.M. Through fall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondônia, Brazil). *Hydrology and Earth Systems Science*. Vol. 10, 2005, pp. 383-393.
- GUEVARA-ESCOBAR, A., GONZALEZ-SOSA, E., VELIZ-CHAVEZ, C., VENTURA-RAMOS, E., and RAMOS-SALINAS, N.M. Rainfall interception and distribution patterns of gross precipitation around an isolated *Ficus benjamina* tree in an urban area. *J. Hydrol.* Vol. 333, 2006 532-541.
- KEIM, R.F. and SKAUGSET, A.E. Modeling effect of forest canopies on slope stability. *Hydrological Processes*. Vol. 17, No. 7, 2003, pp. 1457-1467.
- KRISHNAMURTHY, L. y RENTE-NASCIMIENTO, J. Área Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, 1998.
- McPHERSON, E.G., SIMPSON, J.R., PEPER, P.J., MACO, S.E., GARDNER, S.L., COZAD, S.K., and XIAO, Q. *Benefits, costs and strategic plantig*. Davis, USA: Center for Urban Forest Research (CUFR). USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2006, www.fs.fed.us/psw.
- McPHERSON, E.G. A Benefit-Cost Analysis of Ten Street Tree Species in Modesto, California, U.S. *Journal of Arboriculture*. Vol. 29, No. 1, January, 2003, pp. 1-8.
- NOWAK, D.J. and DEWYER, J.F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In: Handbook of urban and community forestry in the Northeast. Kuser, J.E. (comp.). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000, pp. 11-25.
- RUTTER, A.J., KERSHAW, K.A., ROBIN, P.C., and MORTON, A.J. A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican Pine. *Agric. Meteorol.* Vol. 9, 1971, pp. 367-384.
- SANDERS, R.A. Urban vegetation impacts on the urban hydrology of Dayton Ohio. *Urban Ecol.* Vol. 9, 1986, pp. 361-376.
- SAVENIJE, H. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrol. Process*. Vol. 18, 2004, pp. 1507-1511.
- SAXON, C.Z. Tree Inventory and Identification of Tree Deficient Areas. *American Forests*. 1999, pp. 361-376.
- URBAN WATERSHED FOREST MANUAL. *Part 1: Methods for Increasing Forest Cover in a Watershed*. Newtown Square: United States Department of Agriculture, Forest Service, 2005.
- XIAO, Q., MCPHERSON, E.G., SIMPSON, J.R., and USTING, S.L. Rainfall interception by Sacramento's urban forest. *Journal of Arboriculture*. Vol. 24. No. 4, 1998, 235-244.
- XIAO, Q., MCPHERSON, E.G., USTING, S.L., and GRISMER, E.M. A New approach to modelling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical research*. Vol. 29, No. 173, 2000, 188 pp.
- XIAO, Q. and MCPHERSON, E.G. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. *Urban Ecosystems*. Vol. 6, 2002, pp. 291-302.

Abstract

VÉLIZ-CHÁVEZ, C., GONZÁLEZ-SOSA, E., BARAJAS-ORTIZ, S. & RAMOS SALINAS, N.M. The screen or shadow effect of trees on urban runoff. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 4, October-December, 2012, pp. 73-87.

The functioning of the urban forest depends on the intensity and angle of the precipitation, the interceptor capacity, wind speed and direction, and the spatial location of trees. The screen effect of urban vegetation is a determinant of the generation of urban runoff, the efficiency of the drainage system and the levels of contamination caused by the contaminants on the streets. This work investigates the screen or shadow effect on urban runoff based on an isolated tree of the species *Ficus benjamina*. The interceptor flow was based on the system developed by Guevara-Escobar et al. (2006), built with transparent plastic. In this case, the plastic was substituted by transparent polycarbonate in order to reduce the losses produced by the wind force and turbulence. The accumulated volume for the 88 events was 21.36 m³ (with no tree). Taking into account the loss from interception, this was reduced to 6.97 m³, a difference of 14.39 m³. The calculated cost of precipitation (P_g) was 30.51 m³s⁻¹, which was reduced to 8.49 m³s⁻¹ when taking into account loss from interception. The distance of the screen effect was found to be 4.43 m, according to the ratio proposed by David et al. (2006), the morphological characteristics of the *Ficus benjamina* species and its architecture. The difference between the cost produced and net precipitation P_n was 22.01 m³s⁻¹. The results show that the functioning of the urban forest as a control-obstruction structure and its benefit to urban runoff depends on its spatial location in the urban zone.

Keywords: screen effect, interception, urban hydrology, urban runoff.

Dirección institucional de los autores

M. en C. Pablo César Véliz-Chávez

Departamento de Tecnología, Ciencia, Arte y Humanidades
Universidad del Valle de México, Campus Querétaro
Blvd. Villas del Mesón 1000, col. Provincia Juriquilla
76230, Santiago de Querétaro, Querétaro, MÉXICO
Teléfono: +52 (442) 2111 900
Fax: +52 (442) 2111 900, extensión 11916
cesarvelizdgo@yahoo.com.mx

Dr. Enrique González-Sosa

Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Centro Universitario s/n
Cerro de las Campanas
76010 Santiago de Querétaro, MÉXICO
Teléfono: +52 (442) 1921 200, extensión 6074
Fax: +52 (442) 1921 200, extensión 6023
egs@uaq.mx

Dra. Sofía del Rocío Barajas-Ortiz

Departamento de Tecnología, Ciencia, Arte y Humanidades
Universidad del Valle de México, Campus Querétaro
Blvd. Villas del Mesón 1000, col. Provincia Juriquilla
76230, Santiago de Querétaro, Querétaro, MÉXICO
Teléfono: +52 (442) 2111 900, extensión 11694
Fax: +52 (442) 2111 900, extensión 11916
sofia.barajasor@uvmnet.edu

Dra. Norma Maricela Ramos-Salinas

Gestión, Tecnología e Innovación, F.C.A.
Universidad Autónoma de Querétaro
Coordinación de Doctorado
Centro Universitario s/n, Cerro de las Campanas
76010 Santiago de Querétaro, Querétaro, MÉXICO
Teléfonos: +52 (442) 1921 200, extensión 5260
Fax: +52 (442) 2154 772
nmrs5@hotmail.com