

Dinámica del agua de lluvia en árboles de selva baja caducifolia*

Dynamics of rainwater in trees low deciduous forest

Finlandia Barbosa Moreno¹, Demetrio Salvador Fernández Reynoso^{2§}, Erasmo Rubio Granados², Ignacio Sánchez Cohen³ y José Rafael Contreras Hinojosa¹

¹Campo Experimental Valles Centrales -INIFAP. Melchor Ocampo No. 7, C. P. 68200, Santo Domingo Barrio Bajo, Etna, Oaxaca, México. ²Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km 36.5 C. P. 56230, Montecillo, Texcoco, México. ³Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA-INIFAP). km 6.5 Canal Sacramento, Las Huertas, C. P. 35140, Gómez Palacio, Durango, México. [§]Autor para correspondencia: demetriosfr@gmail.com.

Resumen

La Selva Baja Caducifolia se desarrolla en áreas semiáridas con déficit de agua y es la cubierta vegetal con la mayor extensión a nivel mundial y nacional con 42% y 60% de cobertura, respectivamente. Una de las zonas que mejor representan este biosistema en México es la Región Mixteca. La cobertura arbórea de esta selva, por la intercepción de las gotas de lluvia del dosel, impacta el escurrimiento y la erosión hídrica. Con el propósito de conocer el efecto del dosel en la intercepción de la lluvia, se midió el flujo caulinar, el flujo de dosel y la lámina interceptada por el follaje. Estas mediciones se usaron para establecer relaciones matemáticas, utilizando regresión lineal múltiple, que permitieron calcular sus magnitudes; a través de valores conocidos de lámina de lluvia, por evento, y geometría del dosel. Las mediciones se realizaron durante 2013, en 21 árboles (9 especies) predominantes de la Selva Baja Caducifolia, para 350 eventos de lluvia ocurridos en cinco sitios representativos de la región Mixteca. Los árboles en promedio registraron un flujo de dosel 66.5%, flujo caulinar 6.1% e intercepción 27.5%. La información de campo permitió identificar los mejores modelos para evaluar la dinámica del flujo de agua de lluvia. Entre valores observados y predichos se obtuvo un R^2 de 0.83 para la lámina interceptada, de 0.96 para flujo

Abstract

The Low Deciduous Forest develops in semi-arid areas with water deficits and vegetative cover to the greatest extent at global and national level with 42% and 60% coverage, respectively. One of the areas that best represent this biosystem in Mexico is the Mixteca region. The tree cover of this forest, by the interception of raindrops canopy, impact runoff and water erosion. In order to know the effect of canopy interception of rain, cauline flow, flow sheet canopy and intercepted by foliage he was measured. These measurements were used to establish mathematical relationships using multiple linear regression, which allowed to calculate their magnitudes; through known values of sheet rain, event, and geometry of the canopy. Measurements were made during 2013 in 21 trees (9 species) predominate in Low Deciduous Forest, 350 rain events occurred in five representative sites in the Mixteca region. Trees on average recorded a flow of canopy 66.5%, 6.1% cauline flow and interception 27.5%. Field data identified the best models to evaluate the flow dynamics rainwater. Between observed was obtained and predicted values an R^2 of 0.83 for the intercepted sheet flow of 0.96 to 0.67 for canopy and cauline flow. These relationships are useful to feed simulation models that estimate the hydrological balance of this ecosystem.

* Recibido: abril de 2016
Aceptado: julio de 2016

de dosel y de 0.67 para flujo caulinar. Estas relaciones son útiles para alimentar modelos de simulación que estimen el balance hidrológico de este ecosistema.

Palabras clave: flujo de dosel, flujo caulinar, intercepción dosel, Región Mixteca.

Introducción

La Selva Baja Caducifolia es un ecosistema frágil y de baja resiliencia caracterizado por su alto nivel de endemismo, estacionalidad y presencia de árboles caducifolios de porte bajo con copas extendidas; generalmente se localiza en formaciones montañosas con pendientes de moderadas a fuertes. La vegetación de éste biosistema cubre 42% de extensión a nivel mundial y en México es el tipo de vegetación tropical con la mayor distribución geográfica (60%), García *et al.* (2005). En México se distribuye principalmente sobre una franja, en la vertiente del Océano Pacífico, desde el estado de Sonora hasta Chiapas, y en pequeñas áreas aisladas a lo largo del territorio nacional (Trejo, 1999; Castillo *et al.*, 2007).

En ambientes climáticos semiáridos, comunes en el área de la Selva Baja Caducifolia en México, el efecto de la vegetación es importante porque regula diferentes procesos hídricos entre ellos la intercepción de la precipitación (Fathizadeh *et al.*, 2014), que es un tema poco estudiado para especies vegetales de clima semiárido (Delphis *et al.*, 2011; Méndez *et al.*, 2014; Pérez *et al.*, 2014; Zhi-Bin *et al.*, 2014; Sadeghi *et al.*, 2015). El análisis de este proceso, y la generación de parámetros aplicables a este tipo de vegetación, permitirá evaluar y valorar el comportamiento del flujo de agua precipitada y determinar la influencia real de las plantas en la ganancia (infiltración) y pérdida de agua (intercepción). Los elementos para evaluar los componentes del fraccionamiento de la lluvia, para las especies vegetales, son el flujo de dosel y flujo caulinar (Van Dijk and Bruijnzeel, 2001; Clark *et al.*, 2008; Muzylo *et al.*, 2009; Bulcock and Jewitt, 2010; Bulcock and Jewitt, 2012; Dohnal *et al.*, 2014). Una variable determinante para calcular la intercepción, el flujo caulinar y el flujo de dosel, por cada especie vegetal, es el índice de área foliar (IAF) y la lámina precipitada (Luo *et al.*, 2002; Boken and Chandra, 2012; Martin *et al.*, 2013).

La intercepción de la lluvia empieza con la caída de agua sobre la vegetación, una parte de la misma atraviesa el follaje (flujo de dosel) y disminuye la velocidad de caída del agua

Keywords: canopy flow, canopy interception, flow cauline, Mixteca region.

Introduction

The Low Deciduous Forest is a fragile and low resilience ecosystem characterized by its high level of endemism, seasonality and presence of deciduous trees of low height with extended cups; generally it located in mountainous formations with moderate to strong slopes. The vegetation of this biosystem covers 42% extension worldwide and in Mexico is the kind of tropical vegetation with the largest geographical distribution (60%), García *et al.* (2005). In Mexico it is distributed primarily on a strip on the side of the Pacific Ocean from the state of Sonora to Chiapas, and in small isolated areas throughout the national territory (Trejo, 1999; Castillo *et al.*, 2007).

In semi-arid climatic environments, common in the area of tropical Low Deciduous Forest in Mexico, the effect of vegetation is important because it regulates various water processes including interception of precipitation (Fathizadeh *et al.*, 2014), which is a subject little studied plant species for semiarid climate (Delphis *et al.*, 2011; Méndez *et al.*, 2014; Pérez *et al.*, 2014; Zhi-Bin *et al.*, 2014; Sadeghi *et al.*, 2015). The analysis of this process, and generating parameters applicable to this type of vegetation, will assess and evaluate the flow behavior of precipitated water and determine the actual influence of plants on the gain (infiltration) and water loss (interception). The elements to evaluate the components of fractionation of rain, for plant species, are the flow of canopy and cauline flow (Van Dijk and Bruijnzeel, 2001; Clark *et al.*, 2008; Muzylo *et al.*, 2009; Bulcock and Jewitt, 2010; Bulcock and Jewitt, 2012; Dohnal *et al.*, 2014). A determining factor for calculating the interception variable, the cauline flow and flow canopy, for each plant species, is the leaf area index (IAF) and the precipitated sheet (Luo *et al.*, 2002; Boken and Chandra, 2012; Martin *et al.*, 2013).

The interception of the rain begins to drop water on the vegetation, part of it through the foliage (flow canopy) and decreases the rate of fall of water precipitated, another small part runs off the trunk or main axis plants (cauline flow) and can reach the ground surface (Sun *et al.*, 2013; Seyed *et al.*, 2015). The measurement of this process for both arid and semiarid conditions has it done in huizache trees (*Acacia*

precipitada, otra mínima parte escurre por el tronco o eje principal de las plantas (flujo caulinar) y puede alcanzar la superficie del suelo (Sun *et al.*, 2013; Seyed *et al.*, 2015). La medición de este proceso tanto para condiciones áridas y semiáridas se ha hecho en árboles de huizache (*Acacia farnesiana*), en donde se registra en promedio 15 a 27%; mezquite (*Prosopis laevigata*), con valores 17 a 27 %; acacia (*Acacia rigidula* y *Acacia berlandieri*), 1.12 a 3.6% y huamúchil (*Pithecellobium ebano* y *Pithecellobium pallens*), 1.5 a 10.3% (Návar *et al.*, 2008; Mastachi *et al.* 2010). En bosque de coníferas la variación de la intercepción es 11 a 51% para una misma especie (Xu *et al.*, 2013).

En el marco de los trabajos experimentales ya mencionados, no se disponen de estudios específicos de cuantificación de flujos de agua para las principales especies arbóreas nativas que crecen en la Selva Baja Caducifolia, motivo por el cual se realizó la presente investigación desarrollada en diferentes sitios de estudio de la región Mixteca, con el objetivo de generar valores de parámetros hídricos básicos, en función de la geometría del dosel, útiles para modelos de simulación hidrológicos. La cuantificación de los flujos de agua permitirá emitir recomendaciones para la valoración hídrica de las plantas.

Materiales y métodos

Área de estudio

La región de la Mixteca se conforma de 254 municipios de los cuales 194 pertenecen al estado de Oaxaca, 16 a Guerrero y 44 a Puebla. Por ser la región Mixteca una zona muy extensa, para el estado de Puebla se seleccionaron dos lugares representativos (Tecomatlán y Tehuizingo), uno para Guerrero (Xochihuehuetlán y Huamuxtitlán), y otro para Oaxaca (San Pedro Añãne). Estos sitios se localizan entre los 17° 31' 30.1"- 18° 20' 18.8" de latitud norte y los 97° 22' 08.4"- 98° 34' 54.3" de longitud oeste.

La Mixteca forma parte de la provincia morfotectónica de la Sierra Madre del Sur y Sierra de Oaxaca, esta presenta una orografía accidentada con altitudes que van desde 1 000 a los 2 000 m y pendientes mayores al 8%.

En el área de estudio, la cobertura vegetal predominante es la Selva Baja Caducifolia usada principalmente para el agostadero del ganado. Este ecosistema, localizado desde

farnesiana) in which is recorded on average 15-27%; mesquite (*Prosopis laevigata*), with values 17-27%; acacia (*Acacia rigidula* and *Acacia berlandieri*), 1.12 to 3.6% and Huamuchil (*Pithecellobium ebano* and *Pithecellobium pallens*), 1.5 to 10.3% (Návar *et al.*, 2008; Mastachi *et al.* 2010). In coniferous forest interception variation is 11-51% for the same species (Xu *et al.*, 2013).

As part of the experimental work already mentioned, they do not have specific studies quantifying water flow to the main native tree species that grow in Low Deciduous Forest, why this research developed at different sites was conducted study of the Mixteca region, with the aim of generating values of basic water parameters, depending on the geometry of the canopy, useful for hydrological simulation models. Quantification of water flows allow the water issue recommendations for assessment of plants.

Materials and methods

Study area

The Mixteca region is made up of 254 of the 194 municipalities which belong to the state of Oaxaca, Guerrero and 16 to 44 to Puebla. As the Mixteca region a very large area, for the state of Puebla two representative locations were selected (Tecomatlán and Tehuizingo), one for Guerrero (Xochihuehuetlán and Huamuxtitlán), and one for Oaxaca (San Pedro Anane). These sites are located between 17° 31' 30.1"- 18° 20' 18.8" north latitude and 97° 22' 08.4"- 98° 34' 54.3" west longitude.

The Mixteca is part of the morphotectonic province of the highlands mother of the south and highlands of Oaxaca, this presents a rugged terrain with altitudes ranging from 1 000 to 2 000 m and slopes greater than 8%.

In the study area, the predominant vegetation cover is Low Deciduous Forest mainly used for cattle pasture. This ecosystem, located from sea level to 1 700 msnm, the thermal and water limit the types of vegetation of the warm-humid areas. They occur in areas with above average annual temperatures 20 °C and average annual rainfall of about 800 mm; with a severe dry season which can last 7 or 8 months. Based on FAO (2014) classification the predominant soils in the region are leptosols, regosols and phaeozem.

el nivel del mar hasta los 1 700 mm, constituye el límite térmico e hídrico de los tipos de vegetación de las zonas cálido-húmedas. Se presentan en zonas con promedio de temperaturas anuales superiores a 20 °C y precipitaciones medias anuales del orden de 800 mm; con una temporada seca severa que puede durar 7 u 8 meses. Con base en la clasificación FAO (2014) los suelos predominantes en la región son el leptosol, regosol y feozem.

Selección de la vegetación

Los árboles seleccionados, para el análisis del flujo del agua de lluvia, se eligieron con base a los siguientes criterios: bajo consumo de agua, sistema radical pivotante de raíces profundas, copa extensa, poca demanda de nutrimentos, fijadores de nitrógeno, y abundancia en el paisaje (Cuadro 1).

Selection of vegetation

The trees selected for analysis of the flow of rainwater, were chosen based on the following criteria: low water consumption, pivoting root system deep roots, extensive glass, low demand for nutrients, nitrogen fixers, and abundance in landscape (Table 1).

In these species the crown area (Ac) and leaf area index (IAF) through equations determined Dieguez *et al.* (2003). The IAF was calculated with the CSIRO Land and Water Forest Tools v1.0 software (Siggins, 2014) by taking, with three repetitions per tree, hemispherical photographs (Rajaei, 2014).

Water flows. Fractionation of rain, for selected plant species consisted of measuring rainfall during the cycle of the cauline flow (F_c), canopy flow (F_d) and precipitation (P_p). To measure F_c , they were placed, spirally shaped, plastic tubing 1.0 m

Cuadro 1. Especies estudiadas de árboles de Selva Baja Caducifolia, Región Mixteca, México.
Table 1. Species studied trees of low deciduous forest, Mixteca region, Mexico.

Localidad	Nombre común	Nombre científico	Núm. de árbol
San Pedro Añãe, Oaxaca	Enebro	<i>Juniperus fláccida</i>	1
	Enebro	<i>Juniperus fláccida</i>	2
	Enebro	<i>Juniperus fláccida</i>	3
	Rhus	<i>Rhus standleyi</i>	4
	Rhus	<i>Rhus standleyi</i>	5
Tecomatlán, Puebla	Palo blanco	<i>Acacia coulteri</i>	1
	Casahuate blanco	<i>Ipomoea arborescens</i>	2
	Casahuate blanco	<i>Ipomoea arborescens</i>	3
Tehuiztingo, Puebla	Palo camarón	<i>Caesalpinia hintonii</i>	1
	Palo camarón	<i>Caesalpinia hintonii</i>	2
	Palo camarón	<i>Caesalpinia hintonii</i>	3
	Espino	<i>Acacia</i> sp.	4
	Espino	<i>Acacia</i> sp.	5
Xochihuehuetlán, Guerrero	Tehuixtle	<i>Acacia bilimekii</i>	1
	Tehuixtle	<i>Acacia bilimekii</i>	2
	Copal hediondo	<i>Bursera submoniliformis</i>	3
	Copal hediondo	<i>Bursera submoniliformis</i>	4
	Copal hediondo	<i>Bursera submoniliformis</i>	5
Huamuxtitlán, Guerrero	Pochote de secas	<i>Ceiba parvifolia</i>	1
	Pochote de secas	<i>Ceiba parvifolia</i>	2
	Pochote de secas	<i>Ceiba parvifolia</i>	3

En estas especies se determinó el área de la copa (Ac) y el índice de área foliar (IAF) a través de las ecuaciones de Diéguez *et al.* (2003). El IAF se calculó con el software

long in the stem of the tree; the flow of the hoses are caught in a container placed at the foot of the tree (Figure 1). To determine the F_c , equation 1 was used:

CSIRO Land and Water Forest Tools v1.0 (Siggins, 2014) mediante la toma, con tres repeticiones por árbol, de fotografías hemisféricas (Rajaei, 2014).

Flujos de agua. El fraccionamiento de la lluvia, para las especies vegetales seleccionadas, consistió en medir durante el ciclo de lluvias el flujo caulinar (F_c), flujo de dosel (F_d) y la precipitación (P_p). Para medir el F_c , se colocaron, en forma de espiral, mangueras de plástico de 1.0 m de longitud en el tallo de los árboles; el flujo de las mangueras se captó en un recipiente colocado al pie de los árboles (Figura 1). Para determinar el F_c se utilizó la ecuación 1:

$$F_c = \frac{V}{Ac} * 1000 \quad 1)$$

Donde: F_c = flujo caulinar (mm); Ac = área de la copa (m^2); V = volumen captado en el recipiente por evento de lluvia (m^3).

El agua precipitada que atraviesa el dosel (F_d) se midió con pluviómetros de dosel, que consisten en una canaleta metálica de forma triangular y tamaño variable, según las dimensiones del follaje, la longitud promedio de la canaleta fue de 0.36 m. Este pluviómetro se colocó debajo del dosel y con el desnivel suficiente para concentrar el agua, a través de una manguera, a un recipiente para su registro posterior (Figura 1). El F_d se calculó con la ecuación 2:

$$F_d = \frac{V}{Acc} * 1000 \quad 2)$$

Donde: F_d = flujo de dosel (mm); V = volumen captado en el recipiente por evento de lluvia (m^3); Acc = área de captación de la canaleta (m^2).

La precipitación se midió con un pluviómetro estándar, los registros se realizaron en unidades de volumen, luego se convirtieron a lámina considerando un factor de 35 mililitros por cada milímetro (Figura 1). La lámina interceptada (L_i) se calculó con la ecuación 3.

$$L_i = P_p - (F_d + F_c) \quad 3)$$

Donde: L_i = lámina interceptada (mm); P_p = precipitación del sitio (mm); F_d = flujo de dosel (mm); F_c = flujo caulinar (mm).

Análisis de datos. En 2013, en los cinco sitios se registraron 350 observaciones, con los cuales se obtuvieron los valores de F_c , F_d y L_i , para cada especie vegetal seleccionada en los sitios de estudio. La lámina interceptada calculada (L_{ic}) se determinó en relación lineal con IAF. Las ecuaciones de flujo

$$F_c = \frac{V}{Ac} * 1000 \quad 1)$$

Where: F_c = cauline flow (mm); Ac = crown area (m^2); V = volume captured in the container by rain event (m^3).

The precipitated water flowing through the canopy (F_d) was measured with rain gauges canopy, consisting of a triangular metal conduit and resizable, depending on the size of the foliage, the average length of the channel was 0.36 m. This rain gauge was placed under the canopy and with sufficient gap to concentrate water through a hose to a container for registration (Figure 1). The F_d is calculated with equation 2:

$$F_d = \frac{V}{Acc} * 1000 \quad 2)$$

Where: F_d = canopy flow (mm); V = volume captured in the container by rain event (m^3); Acc = catchment area of the chute (m^2).

The precipitation was measured with a standard rain gauge records were performed in units of volume, then they became a film considering a factor of 35 milliliters per millimeter (Figure 1). Intercepted sheet (L_i) was calculated using Equation 3.

$$L_i = P_p - (F_d + F_c) \quad 3)$$

Where: L_i = intercepted sheet (mm); P_p = site precipitation (mm); F_d = canopy flow (mm); F_c = cauline flow (mm).



Figura 1. Instrumentación en la unidad experimental, región Mixteca.

Figure 1. Instrumentation in the experimental unit, Mixteca region.

Analysis of data. In 2013, five sites were recorded 350 observations, with which the values of F_c , F_d and L_i , for each plant species selected study sites were obtained. Intercepted

de dosel y flujo caulinar (F_{dc} y F_{cc}) se obtuvieron a través de un análisis matemático de regresión múltiple, utilizando el software SAS (SAS, 2010), en función del índice de área foliar, la precipitación y la lámina interceptada.

Resultados y discusión

Fraccionamiento de la Lluvia

En el Cuadro 2 se reportan los promedios observados, por árbol instrumentado, de área foliar y láminas de agua en que se disocia la precipitación al alcanzar el dosel. El comportamiento de los componentes del fraccionamiento de la lluvia corresponde al descrito por Swaffer *et al.* (2014) que sugiere que a mayor precipitación mayor flujo caulinar, flujo de dosel y lamina interceptada; esta última con un límite máximo marcado por el índice de área foliar de cada especie vegetal.

sheet calculated (L_{ic}) was determined in linear relationship with IAF. The flow equations canopy and cauline flow (F_{dc} and F_{cc}) were obtained through a mathematical analysis of multiple regression using SAS (SAS, 2010) software, depending on the leaf area index, precipitation and the intercepted sheet.

Results and discussion

Fractionation of rain

In the Table 2 shows the observed averages reported by instrumented tree, leaf area and water bodies in precipitation to reach the canopy dissociates. The behavior of the components of fractionation rain corresponds to that described by Swaffer *et al.* (2014) suggests that greater cauline flow increased precipitation, canopy and intercepted flow sheet; the latter with a maximum limit set by the leaf area index of each plant species.

Cuadro 2. Valores observados de la fragmentación de la lluvia, promedios por árbol.

Table 2. Observed values fragmentation of rain, average per tree.

Localidad	Núm. de árbol	Eventos de lluvia	Af(m ²)	IAF	P _p (mm)	F _d (mm)	F _c (mm)	L _i (mm)
San Pedro Añãne, Oaxaca	1	19	3.44	1.72	14.1	10.1	0.6	3.42
	2	16	3.29	1.05	13.6	11	0.6	2.08
	3	17	3.2	0.85	13.8	11.8	0.3	1.69
	4	19	11.31	1.5	13.3	10.4	0.4	2.5
	5	18	8.38	1.52	13.7	10.3	0.3	3
Tecomatlán, Puebla	1	10	104.1	1.41	19.5	14.1	0.8	4.55
	2	7	19.85	0.78	15.3	9.7	2.4	3.23
	3	14	11.71	1.09	15.9	12.6	0.9	2.32
Tehuiztingo, Puebla	1	10	50.46	5.9	20.7	10.6	2.2	7.96
	2	19	23.1	2.58	14.9	9.1	0.4	5.45
	3	13	34.53	2.6	16.1	9.4	1.1	5.64
	4	16	10.54	2.6	16.2	9.3	1.5	5.47
	5	13	8.66	2.65	13.9	7.9	0.5	5.58
Xochihuehuetlán, Guerrero	1	23	218.54	4.14	22.4	13.7	1.6	7.16
	2	21	322.16	5.52	22.6	14.4	0.8	7.42
	3	18	103.1	2.4	23.3	14.4	3.5	5.41
	4	19	212.09	3.22	24.8	14.8	3.2	6.81
	5	12	145.5	3.39	24.2	13.8	3.2	7.16
Huamuxtitlán, Guerrero	1	22	63.63	1.8	8.7	5	0.1	3.62
	2	24	36.23	1.44	8.3	5.3	0.1	2.86
	3	20	8.8	0.87	5.5	3.6	0.1	1.72
Total	21	350	Promedio	2.33	16.2	10.5	1.2	4.5
			Máximo	5.9	24.8	14.8	3.5	7.96
			Mínimo	0.78	5.5	3.6	0.1	1.7

* IAF= índice de área foliar; Af= área foliar; P_p= precipitación; F_d= flujo de dosel; F_c= flujo caulinar y L_i= lámina interceptada.

En términos porcentuales, para los árboles analizados (Figura 2), se registraron valores promedio para flujo de dosel 66.5%, flujo caulinar de 6.1% y lámina interceptada de 27.5%; los valores extremos para flujo de dosel fueron de 79.2 a 56.8%, flujo caulinar de 13.8 a 1.6% y en el caso de la interceptación oscilaron entre 36.9 a 17.3%. Los resultados de lámina de lluvia interceptada coinciden con lo reportado en la literatura, de acuerdo con Maloney *et al.* (2002) puede ser del orden de 15 a 35%; mientras que el flujo de dosel puede alcanzar 77% (Ufoegbune *et al.*, 2010).

Por tipo de árbol se muestra, en términos porcentuales, que la máxima lámina interceptada se observó en el espino (*Acacia* sp.) con 36.9%, mientras que los valores de interceptación más bajos se obtuvieron para el enebro (*Juniperus flaccida*) y el casahuate blanco (*Ipomoea arborescens*); con 17.3 y 17.9% respectivamente, éstos valores mínimos corresponden con lo obtenido por Flores *et al.* (2013).

En términos generales se observa (Figura 2) la relación inversa entre la lámina interceptada y el flujo de dosel, lo que propicia que el flujo caulinar se mantenga alrededor de 6.1% de la lámina total de lluvia; excepto el copal hediondo (13.8%) y el casahuate blanco (10.8%) que presentaron los valores más altos.

Intercepción pluviométrica. El IAF se consideró como parámetro estándar (Gómez *et al.*, 2001; De Jong and Jetten, 2007; Vegas *et al.*, 2012) para correlacionar las láminas interceptadas por los árboles estudiados. Esta correlación, entre IAF y los valores medidos de L_i , se realizó con regresión lineal simple. De la correlación, entre valores observados y calculados (L_{ic}), se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.8281 (Figura 3). La ecuación que describe la lámina interceptada, para las principales especies vegetales de Selva Baja Caducifolia, es la siguiente:

$$L_{ic} = 1.2852 * IAF + 1.526 \quad 4)$$

Donde: L_{ic} = lámina interceptada calculada (mm); índice de área foliar (IAF).

Flujo de dosel. Para determinar el modelo predictivo de flujo de dosel (F_{dc}) se correlacionó, a través de regresión lineal múltiple, el flujo de dosel observado (F_d) con las mediciones de índice de área foliar (IAF), precipitación (P_p) y lámina interceptada (L_i). De la correlación, entre valores observados (F_d) y calculados (F_{dc}), se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9621 (Figura 4). La

In percentage terms, for trees analyzed (Figure 2), average values were recorded for 66.5% canopy flow, flow cauline 6.1% and 27.5% intercepted sheet; extreme values for flow canopy were 79.2 to 56.8%, 13.8 to 1.6% of cauline flow and in case of interception ranged from 36.9 to 17.3%. The results Reed intercepted rainfall coincide with those reported in the literature, according to Maloney *et al.* (2002) may be of the order of 15 to 35%; while the flow canopy can reach 77% (Ufoegbune *et al.*, 2010).

By type of tree shown, in percentage terms, the maximum intercepted film was observed in the thorn (*Acacia* sp.) With 36.9%, while values lower interception were obtained for juniper (*Juniperus flaccida*) and casahuate white (*Ipomoea arborescens*); with 17.3 and 17.9% respectively, these minimum values correspond to those obtained by Flores *et al.* (2013).

In general terms shows (Figure 2) the inverse relationship between the intercepted flow sheet and canopy, which favors the cauline flow is maintained around 6.1% of the total rain sheet is observed; except hediondo copal (13.8%) and white casahuate (10.8%) that presented the highest values.

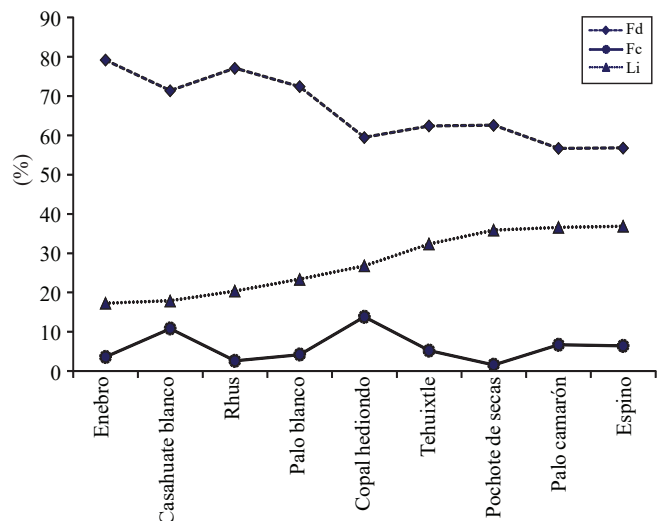


Figura 2. Composición de la lámina de lluvia (%) observada para árboles de Selva Baja Caducifolia, Región Mixteca.

Figure 2. Composition of the sheet of rain (%) observed for trees of Low Deciduous Forest, Mixteca region.

Rainfall interception. The IAF was considered as a standard parameter (Gómez *et al.*, 2001; De Jong and Jetten, 2007; Vegas *et al.*, 2012) to correlate the sheets intercepted by trees studied. This correlation between IAF and the measured values of L_i , was performed using simple linear regression.

ecuación que describe el flujo de dosel, para las principales especies vegetales que crecen en el ecosistema de Selva Baja Caducifolia, es:

$$F_{dc} = 1.587094 + 0.435693IAF + 0.841686P_p - 1.264808L_i \quad 5)$$

Donde: F_{dc} = flujo de dosel calculado (mm); índice de área foliar (IAF); P_p = precipitación (mm); L_i = lámina interceptada (mm).

La ecuación 5 es válida solo cuando se conocen las diferentes fracciones del flujo, en el caso de que no se conozca la lámina interceptada, es conveniente aplicar la siguiente ecuación, obtenida al sustituir la L_{ic} de la ecuación 4 en la L_i de la ecuación 5:

$$F_{dc} = -0.343003 - 1.189838IAF + 0.841686P_p \rightarrow R^2 = 0.8848$$

Donde: F_{dc} = flujo de dosel calculado (mm); índice de área foliar (IAF); P_p = precipitación (mm).

Conclusiones

El presente trabajo analizó los parámetros hídricos en que se fracciona la lluvia, al alcanzar el dosel de los árboles, de las principales plantas nativas que crecen en el ecosistema de Selva Baja Caducifolia de la región Mixteca. El estudio de estos componentes, es uno de los primeros trabajos para cuantificar el flujo caular, flujo de dosel e intercepción del follaje para este tipo de vegetación.

En las especies estudiadas la lámina de intercepción se relacionó en forma directa, sin importar la magnitud de la precipitación, con el índice de área foliar 83%. De acuerdo a los modelos generados, el flujo de dosel y el flujo caular se pueden estimar con datos de precipitación ocurrida, IAF y lámina de intercepción. Los modelos muestran una relación inversa entre la lámina interceptada y el flujo de dosel, lo que se refleja en flujos caulares con mínimas variaciones, alrededor de 6.1% de la lámina de lluvia.

Dado que un mayor índice de área foliar permitió a las plantas interceptar una mayor lámina de precipitación, en este sentido, para aminorar el proceso de erosión hídrica, se recomiendan especies como el palo camarón (*Caesalpinia hintonii*) y el tehuixtle (*Acacia bilimekii*), que tienen altos índices de área foliar y valores de intercepción superiores

The correlation between observed and calculated values (L_{ic}), a coefficient of determination was obtained (R^2) of 0.8281 (Figure 3). The equation describing the intercepted sheet for the main plant species Low Deciduous Forest, is as follows:

$$L_{ic} = 1.2852 * IAF + 1.526 \quad 4)$$

Where: L_{ic} = intercepted calculated sheet (mm); leaf area index (IAF).

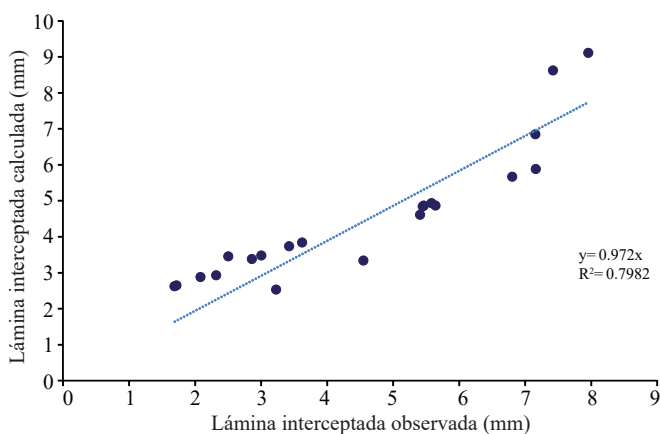


Figura 3. Lámina interceptada observada y calculada, especies de Selva Caducifolia, región Mixteca.

Figure 3. Intercepted sheet observed and calculated Species of Deciduous Forest, Mixteca region.

Flow canopy. To determine the predictive flow model canopy (F_{dc}) was correlated through multiple linear regression, the flow of canopy observed (F_d) with measurements of leaf area index (IAF), precipitation (P_p) and intercepted sheet (L_i). The correlation between observed values (F_d) and calculated (F_{dc}), a coefficient of determination was obtained (R^2) of 0.9621 (Figure 4). The equation describing the flow of canopy for the main plant species growing in the Low Deciduous Forest ecosystem, is:

$$F_{dc} = 1.587094 + 0.435693IAF + 0.841686P_p - 1.264808L_i \quad 5)$$

Where: F_{dc} = calculated flow canopy (mm); leaf area index (LAI); P_p = precipitation (mm); L_i = intercepted sheet (mm).

The equation 5 applies only when the different fractions of the flow are known, in the event that the intercepted sheet is not known, it is convenient to apply the following equation obtained by substituting L_{ic} equation 4 in L_i equation 5:

$$F_{dc} = -0.343003 - 1.189838IAF + 0.841686P_p \rightarrow R^2 = 0.8848$$

a 30%. Por otro lado, árboles con altos flujos caulinares favorecen la recarga natural de acuíferos, tales como el copal hediondo (*Bursera submoniliformis*) y el casahuate blanco (*Ipomoea arborescens*). El árbol que ofrece un equilibrio ideal entre flujo de dosel y el flujo caulinar, tanto para evitar escurrimiento superficial como para favorecer la infiltración del agua en el suelo, es el palo camarón (*Caesalpinia hintonii*), que además es muy utilizado en la zona de estudio como alimento para ganado.

La presente investigación es uno de los primeros trabajos encaminados a cuantificar el flujo caulinar, flujo de dosel e intercepción de la lluvia por el follaje de las principales plantas nativas que crecen en el ecosistema de Selva Baja Caducifolia de la región Mixteca. La generación de parámetros hidrológicos correspondientes al fraccionamiento de la lluvia que alcanza el dosel de la vegetación, permitirá alimentar modelos de simulación hidrológicos para valorar los servicios hídrico-ambientales de este tipo de vegetación.

Literatura citada

- Boken, V. K and Chandra, S. 2012. Estimating leaf area index for an arid region using spectral data. *Afr. Crop Sci. J.* 20(4):215-223.
- Bulcock, H. H. and Jewitt, G. P. W. 2010. Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing for hydrological applications with a particular focus on canopy interception. *Hydrol. Earth System Sci.* 14:383-392.
- Bulcock, H. H. and Jewitt, G. P. W. 2012. Modelling canopy and litter interception in commercial forest plantations in South Africa using the Variable Storage Gash model and idealised drying curves. *Hydrol. Earth System Sci.* 16:4693-4705.
- Castillo, C. G.; Dávila, A. P. y Zavala, H. J. A. 2007. La selva baja caducifolia en una corriente de lava volcánica en el centro de Veracruz: lista florística de la flora vascular. *Boletín de la Sociedad Botánica de México.* 80:77-104.
- Clark, D. B.; Olivas, P. C.; Oberbauer, S. F.; Clark, D. A. and Ryan, M. G. 2008. First direct landscape-scale measurement of tropical rain forest Leaf Area Index, a key driver of global primary productivity. *Ecology Letters.* 11:163-172.
- De Jong, S. M. and Jetten, V. G. 2007. Estimating spatial patterns of rainfall interception from remotely sensed vegetation indices and spectral mixture analysis. *Inter. J. Geographical Inf. Sci.* 21(5):529-545.
- Delphis, F. L.; Darryl, C. M. and Tadashi, T. 2011. *Forest hydrology and biogeochemistry.* Springer. Netherlands. *Ecol. Studies* 216. 740p.
- Diéguez, A. U.; Barrio, A. M.; Castedo, D. F.; Ruíz, G. A. D.; Álvarez, T. M. F.; Álvarez, G. J. G. y Rojo, A. A. 2003. *Dendrometría.* Ediciones Mundi-Prensa. México. 327 p.
- Dohnal, M.; Cerný, T.; Votrubová, J. and Tesar, M. 2014. Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand. *J. Hydrol. Hydromechanics.* 62(4):277-284.

Where: F_{dc} = calculated flow canopy (mm); leaf area index (IAF); P_p = precipitation (mm).

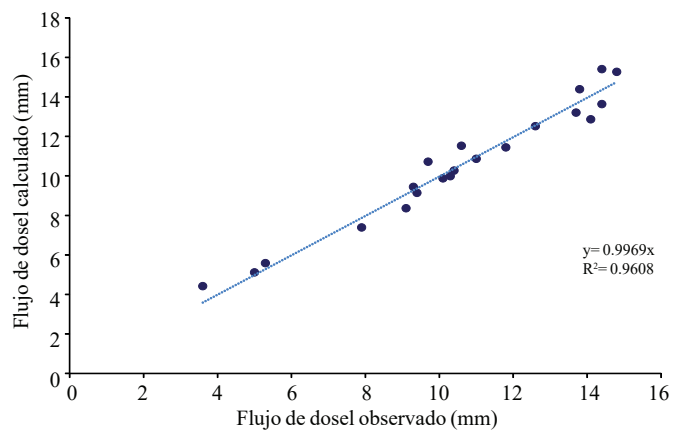


Figura 4. Flujo de dosel observado y calculado (ecuación 5), especies de Selva Caducifolia, región Mixteca.

Figure 4. Flow canopy observed and calculated (equation 5), Species of Deciduous Forest, Mixteca region.

Conclusions

This paper analyzed the water parameters in the rain is split, reaching the canopy, the main native plants growing in the Low Deciduous Forest ecosystem of the Mixteca region. The study of these components is one of the first studies to quantify the cauline flow, flow foliage canopy and interception for this type of vegetation.

In the species studied the sheet interception was related directly, regardless of the magnitude of precipitation, with leaf area index 83%. According to the models generated, the flow cauline canopy and flow can be estimated with precipitation data occurred, IAF and sheet interception. The models show an inverse relationship between the intercepted flow sheet and canopy, which is reflected in cauline flows with minor variations, about 6.1% of the sheet of rain.

Since a greater leaf area index allowed the plants to intercept a larger sheet of precipitation, in this regard, to slow the process of water erosion, species like the stick shrimp (*Caesalpinia hintonii*) and tehuixtle (*Acacia bilimekii*) are recommended, that they have high rates of leaf area and values above 30% interception. On the other hand, trees with high flows caulinees favor natural groundwater recharge, such as stinky copal (*Bursera submoniliformis*) and white casahuate (*Ipomoea arborescens*). The tree that provides an ideal balance between flow canopy and the cauline flow,

- Fathizadeh, O.; Attarod, P.; Keim, R. F.; Stein, A.; Zahedi, G. A. and Asghar, A. D. 2014. Spatial heterogeneity and temporal stability of throughfall under individual *Quercus brantii* trees. *Hydrol. Processes*. 28:1124-1136.
- Flores, A. E.; Becerra, L. F.; Buendía, R. E.; Carrillo, A. F.; Terrazas, G. G. H.; Pineda, O. T. y Acosta, M. M. 2013. Intercepción de lluvia por matorral inerme espinoso en Atotonilco el Grande, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2(4):285-298.
- FAO. 2014. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports* 106. Rome. 191 p.
- García, R. A.; Mendoza, R. K. I. y Galicia, S. L. 2005. Valoración del paisaje de la selva baja caducifolia en la cuenca baja del río Papagayo (Guerrero), México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*. 56:77-100.
- Gómez, J. A.; Giraldez, J. V. and Fereres, E. 2001. Rainfall interception by Olive trees in relation to leaf area. *Agricultural Water Management*. 49:65-76.
- Luo, T.; Ronald, N. P.; Hanqin, T.; Vörösmarty, C. J.; Zhu, H. and Liu, S. 2002. A model for seasonality and distribution of leaf area index of forests and its application to China. *J. Vegetation Sci.* 13:817-830.
- Maloney, D.; Bennett, S.; De Groot, A. and Banner, A. 2002. Canopy interception in a hypermaritime forest on the North Coast of British Columbia. *Extensión Note # 49*. Prince Rupert Forest Region. British Columbia. 6 p.
- Martin, K. A.; Van Stan II, J. T.; Dickerson-Lange, S. E.; Lutz, J. A.; Berman, J. W.; Gersonde, R. and Lundquist, J. D. 2013. Development and testing of a snow interceptometer to quantify canopy water storage and interception processes in the rain/snow transition zone of the North Cascades, Washington, USA. *Water Res. Res.* 49:3243-3256.
- Mastachi, L. C. A.; González, E. S.; Becerril, R. P. y Braud, I. 2010. Pérdidas por intercepción en mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*) de la región semiárida del centro de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 1(1):103-120.
- Méndez, B. L. A.; Vivoni, E. R.; Robles, M. A.; Mascaro, G.; Yezpe, E. A.; Rodríguez, J. C.; Watts, C. J.; Garatuza, P. J. and Saiz, H. J. A. 2014. A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico. *Water Res. Res.* 4(50):3229-3252.
- Muzylo, A.; Llorens, P.; Valente, F.; Keizer, J. J.; Domingo, F. and Gash, J. H. C. 2009. A review of rainfall interception modelling. *J. Hydrol.* 370:191-206.
- Návar, C. J. de J.; Méndez, J. G. y González, H. R. 2008. Intercepción de la lluvia en especies de leguminosas del Nordeste de México. *Terra Latinoam.* 26(1):61-68.
- Pérez, S. M.; Arredondo, M. J. T.; Huber, S. E. and Serna, P. A. 2014. Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. *Ecohydrology*. 2(7):532-543.
- Rajaei, N. M. 2014. Use of smartphone to derive the leaf area index. Thesis Master of Geoinformation Science. Center for Geoinformation. Wageningen University. Wageningen. The Netherlands. 68 p.
- both to avoid surface runoff as to promote water infiltration into the soil, is the stick shrimp (*Caesalpinia hintonii*), which is also widely used in the area study as cattle feed.
- This research is one of the first work aimed at quantifying the cauline flow, flow and canopy rainfall interception by the foliage of the main native plants growing in the low deciduous forest ecosystem of the Mixteca region. The generation of hydrological parameters for the fractionation of the rain that reaches the canopy of vegetation, hydrological models will feed simulation to assess the environmental water-vegetation such services.

End of the English version



- Sadeghi, S. M. M.; Attarod, P. and Pypker, T. G. 2015. Differences in rainfall interception during the growing and non-growing seasons in a *Fraxinus rotundifolia* Mill. Plantation located in a semiarid climate. *J. Agric. Sci. Technol.* 1(17):145-156.
- SAS, 9.3. 2010. SAS Institute Inc. Cary NC. 27513, USA.
- Seyed, M. M. S.; Attaroda, P.; Toland, J. V. S. II; Grant, T. P. and Dunkerley, D. 2015. Efficiency of the reformulated Gash's interception model in semiarid afforestations. *Agric. Forest Meteorol.* 201:76-85.
- Siggins, A. 2014. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Land and Water Forest Tools v1.0. Australia.
- Sun, X.; Wang, G.; Lin, Y.; Liu, L. and Gao, Y. 2013. Intercepted rainfall in *Abies fabri* forest with different-aged stands in southwestern China. *Turk. J. Agric. Forestry.* 37:495-504.
- Swaffer, B. A.; Holland, K. L.; Doody, T. M. and Hutson, J. 2014. Rainfall partitioning, tree form and measurement scale: a comparison of two co-occurring, morphologically distinct tree species in a semi-arid environment. *Ecohydrology*. 5(7):1331-1344.
- Trejo, V. I. 1999. El clima de la selva baja caducifolia en México. *Investigaciones Geográficas (Mx)*. 39:40-52.
- Ufoegbune, G. C.; Ogunyemi, O.; Eruola, A. O. and Awomeso, J. A. 2010. Variation of interception loss with different plant species at the University of Agriculture, Abeokuta, Nigeria. *African J. Environ. Sci. Technol.* 4:831-844.
- Van Dijk, A. I. J. M. and Bruijnzeel, L. A. 2001. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system. *J. Hydrol.* 247:239-262.
- Vegas, G. F.; Álvarez, C.; García, A. and Revilla, J. A. 2012. Estimated distributed rainfall interception using a simple conceptual model and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *J. Hydrol.* 468-469:213-228.
- Xu, Z., Feng, Z.; Zhao, C.; Zheng, J.; Yang, J.; Tian, F.; Peng, H.; Wang, C.; Peng, S. and Sher, H. 2013. The canopy rainfall interception in actual and potential distribution of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest. *J. Hydrol. Hydromech.* 61(1):64-72.
- Zhi-Bin, H.; Jun-Jun, Y.; Jun, D.; Wen-Zhi, Z.; Hu, L. and Xue-Xiang, C. 2014. Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China. *Agric. Forest Meteorol.* 188:58-63.