

Rainfall partitioning in two native tree legumes in the Andean region, Colombia

Partición de la precipitación en dos arbóreas leguminosas nativas en la región Andina, Colombia

Miguel Á. Pabón-Morales¹; Andrés I. Prato^{1*}; Kelly C. Tonello²; Jhon J. Zuluaga-Peláez³; Pilar E. Bucheli-León⁴; Marcos V. Winckler-Caldeira⁵

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación La Suiza. km 32 vía al Mar, vereda Galápagos, Rionegro. Santander, Colombia.

²Universidade Federal de São Carlos/Campus Sorocaba, rodovia João Leme dos Santos (SP-264). km 110, bairro do Itinga, Sorocaba. São Paulo, Brasil.

³Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Nataima. km 9 vía Espinal – Ibagué. Tolima, Colombia.

⁴Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Sede Cúcuta. Calle 6N, 1AE-196, barrio Ceiba II, Cúcuta. Norte de Santander, Colombia.

⁵Universidade Federal do Espírito Santo. Avenida Governador Carlos Lindenberg 316, Centro, CEP 29.550-000, Jerônimo Monteiro. Espírito Santo, Brasil.

*Corresponding author: aprato@agrosavia.co; tel.: +(57) 1 - 4227300 ext. 2736.

Abstract

Introduction: Understanding the hydrological balance and canopy structure in forest ecology and reforestation can predict the productivity of plantations.

Objectives: To monitor an incident rainfall partitioning in a plantation of *Schizolobium parahyba* (Vell.) S. F. Blake and *Samanea saman* (Jacq.) Merr. and its relationship with canopy openness and leaf area index.

Materials and methods: Incident rainfall partitioning was monitored for one year in a plantation of *S. parahyba* (4.4-5.4 years) and *S. saman* (5.8-6.8 years) in Rionegro, Santander, Colombia. Each plantation had linear rain gauges installed under the canopy and around the stem of the trees selected.

Results and discussion: Throughfall (Tf), canopy interception losses (I) and stemflow (Sf) in the 12 months corresponded to 77.5, 22.3 and 0.44 %, respectively, in relation to open precipitation for *S. parahyba* (2 270 mm) and to 84.7, 15.3 and 0.05 %, respectively, for *S. saman* (2 140 mm). For both species, Ip and effective precipitation were higher ($P < 0.05$) in the two dry periods of the year, while I and Sf were higher in the two rainy periods. Canopy openness was correlated only with I and Tf in *S. saman*, while leaf area index was not correlated with any variable.

Conclusion: Rainfall partitioning points out different paths in the same studied environment. It is important to analyze the hydrological processes in reforestation environments by taking into account the morphology of the species involved.

Keywords: *Schizolobium parahyba*; *Samanea saman*; leaf area index; canopy openness; internal rainfall.

Resumen

Introducción: En la ecología forestal y reforestación, la comprensión del balance hidrológico y estructura del dosel puede predecir la productividad de las plantaciones.

Objetivos: Monitorear la redistribución de la precipitación incidente en una plantación de *Schizolobium parahyba* (Vell.) S. F. Blake y *Samanea saman* (Jacq.) Merrill y su relación con la apertura del dosel e índice de área foliar.

Materiales y métodos: La redistribución de la precipitación incidente se monitoreó durante un año en una plantación de *S. parahyba* (4.4-5.4 años) y *S. saman* (5.8-6.8 años) en Rionegro, Santander, Colombia. En cada plantación se instalaron pluviómetros lineales debajo de las copas y alrededor del fuste de los árboles seleccionados.

Resultados y Discusión: La precipitación interna (Pi), pérdidas por interceptación del dosel (I) y escurrimiento fustal (Ef) en los 12 meses correspondieron al 77.5, 22.3 y 0.44 %, respectivamente, en relación con la precipitación incidente para *S. parahyba* (2 270 mm) y al 84.7, 15.3 y 0.05 %, respectivamente, para *S. saman* (2 140 mm). Para ambas especies, la Pi y la precipitación efectiva fue mayor ($P < 0.05$) en los dos periodos secos del año, mientras que la I y Ef fueron mayores en los dos periodos lluviosos. La apertura del dosel se correlacionó únicamente con la I y Pi en *S. saman*, mientras que el índice de área foliar no tuvo correlación con alguna variable.

Conclusión: La distribución de la lluvia señala caminos diferentes en el mismo ambiente estudiado. Es importante investigar los procesos hidrológicos en los ambientes de reforestación considerando la morfología de las especies involucradas.

Palabras clave: *Schizolobium parahyba*; *Samanea saman*; índice de área foliar; apertura del dosel; precipitación interna.

Introduction

The processes involved in precipitation partitioning in a forest environment are influenced by the structure and composition of the trees. When interacting with the forest, some raindrops fall through the canopy openness (throughfall), others interact with the leaves and stems of the trees (stemflow) and a part returns to the atmosphere by evaporation (interception losses) (Bessi et al., 2018; Coenders-Gerrits et al., 2020; Tonello et al., 2021a). In this way, throughfall and stemflow form a fraction of rainfall that reaches the forest floor and is known as net precipitation (Pereira et al., 2022; Tonello et al., 2021a) thus affecting the hydrological balance.

However, the results of rainfall partitioning in its three components (throughfall, stemflow and interception) can vary widely among studies of the same ecosystem (Freitas et al., 2016; Limin et al., 2015). Based on the difficulty for understanding the interaction of variables influencing these processes, these have usually been divided into those related to rainfall or meteorological events (duration and intensity) and those characterizing tree morphological traits (Tonello et al., 2021b; Zabret et al., 2018).

A little studied but relevant part of forest water balance is canopy structure (Allen et al., 2020), where tree canopies are an important variable in precipitation partitioning (Sadeghi et al., 2020; Sun et al., 2018; Tonello et al., 2021a). Especially in tropical forests, the seasonality of environmental changes between dry and rainy periods causes several responses in seedling growth and regeneration and canopy leaf composition. Leaf area index, which is the leaf tissue area per horizontal unit area ratio, is considered the major descriptor of plant structure and is related to climate modeling, productivity, health status, agrometeorology, and hydrology (Wang et al., 2018; Woodgate et al., 2015). Another relevant descriptor is canopy openness, which is defined as the proportion of clear sky seen throughout the hemisphere from a single point below the canopy, and which is related to the amount and quality of available light and, therefore, to understory ecological processes (Bessi et al., 2018; Hardwick et al., 2015; Huang et al., 2019). From an ecohydrological point of view, canopy openness can also define the amount of rainfall (and the elements added) that reaches the forest floor and will ultimately contribute to other processes such as infiltration or surface runoff (Friesen, 2020; Van Stan & Allen, 2020). In commercial reforestation projects, these processes are essential to estimate the amount of water that reaches the forest floor or evaporates (Momolli et al., 2019; Souza et al., 2019); however, there are few studies developed in the tropics that study the rainfall partitioning in these situations.

Introducción

Los procesos involucrados en la repartición de la lluvia en un ambiente forestal son influenciados por la estructura y composición de los árboles. Al interactuar con el bosque, algunas gotas de lluvia caen a través de las aberturas del dosel (precipitación interna), otras interactúan con las hojas y fuste de los árboles (escurrimiento fustal) y una parte retorna a la atmósfera por el proceso de evaporación (pérdidas por interceptación) (Bessi et al., 2018; Coenders-Gerrits et al., 2020; Tonello et al., 2021a). De esta manera, la precipitación interna y escurrimiento fustal forman una fracción de lluvia que alcanza el suelo de los bosques y que se conoce como precipitación neta o efectiva (Pereira et al., 2022; Tonello et al., 2021a) influenciando así el balance hidrológico.

No obstante, los resultados de la redistribución de la precipitación incidente en sus tres componentes (precipitación interna, escurrimiento fustal e interceptación) pueden variar ampliamente entre estudios de un mismo ecosistema (Freitas et al., 2016; Limin et al., 2015). Debido a la complejidad para comprender la interacción de las variables que influyen en estos procesos, normalmente estas se han dividido en las relacionadas con los eventos de lluvia o meteorológicas (duración e intensidad) y en las que caracterizan los rasgos morfológicos de los árboles (Tonello et al., 2021b; Zabret et al., 2018).

Una parte poco estudiada, pero relevante en el balance hídrico del bosque, es la estructura del dosel (Allen et al., 2020), donde las copas de los árboles son una variable importante en la repartición de la lluvia (Sadeghi et al., 2020; Sun et al., 2018; Tonello et al., 2021a). Especialmente en los bosques tropicales, la estacionalidad de los cambios ambientales entre los periodos secos y lluviosos causan varias reacciones en el crecimiento y regeneración de las plántulas y en la composición foliar de la copa. El índice de área foliar, que es la relación del área de tejido foliar por unidad horizontal de superficie, se considera el mayor descriptor de la estructura vegetal y tiene relación con el modelamiento climático, productividad, estado sanitario, agrometeorología e hidrología (Wang et al., 2018; Woodgate et al., 2015). Otro descriptor relevante es la apertura del dosel, que se define como la proporción de cielo despejado visto en todo el hemisferio desde un solo punto debajo del dosel, y el cual se relaciona con la cantidad y calidad de luz disponible y, por tanto, con los procesos ecológicos del sotobosque (Bessi et al., 2018; Hardwick et al., 2015; Huang et al., 2019). Desde el punto de vista ecohidrológico, la apertura del dosel también puede definir la cantidad de lluvia (y los elementos agregados a ella) que alcanza el piso forestal y que, finalmente, contribuirá para otros procesos como la infiltración

Two fast growing legumes known as tambor (*Schizolobium parahyba* [Vell.] S. F. Blake) and samán (*Samanea saman* [Jacq.] Merr.) have been exploited for different uses in tropical and subtropical America, from Mexico to southern Brazil; for example, in Brazil there is recent interest in *S. parahyba* for cellulose and paper, both as a pure plantation or in agroforestry systems, because the species is tolerant of low fertility and strong natural acidity of the soil (Barroso et al., 2018). *S. saman* pods are used in silvopastoral systems as a dietary supplement in ruminant or poultry feed, especially during dry periods. Because of its large size, *S. saman* provides a good percentage of shade, and is also of interest in urban tree planting because of its visual attractiveness (Vinodhini & Rajeswari, 2018).

The objective of this study was to monitor rainfall partitioning for one year in an experimental reforestation plot using *S. parahyba* and *S. saman*, and to determine how possible changes in canopy structure are related to the dynamics of precipitation interception, i.e., throughfall and stemflow.

Materials and Methods

Experimental site

The experimental area is located in La Suiza research center of the Colombian Agricultural Research Corporation (AGROSAVIA), municipality of Rionegro, department of Santander, Andean region of Colombia (7° 22' 10" N, 73° 10' 39" W; 550 m elevation). This region has a tropical equatorial climate (Af) and has a bimodal precipitation regime. Historical records from 1989 to 2018 indicate, on average, 27.8 ± 0.5 °C and 1962 ± 281 mm·yr⁻¹ (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2022).

Monitoring of hydrometeorological parameters

Open precipitation, throughfall also known as direct precipitation, and stemflow were monitored from February 15th 2019 to February 15th 2020 for *S. parahyba* (4.4-5.4 years) and from July 1st 2020 to June 30th 2021 for *S. saman* (5.8-6.8 years), on a 1000 m² plot per species.

Six-month-old seedlings grown from commercial seed were established in September 2014 at a planting density of 5 m x 5 m (400 trees·ha⁻¹). Variables for survival, diameter at breast height (DBH: 1.3 m above ground level), total height and at crown initiation, crown projection area, tree canopy width, and bark texture were collected from the forest inventory of the plots. Total height was calculated with a clinometer (Pm-5/360 P, Suunto) and DBH was measured with a diameter tape. When monitoring *S. parahyba*, incident

o escurrimiento superficial (Friesen, 2020; Van Stan & Allen, 2020). En los proyectos de reforestación comercial, estos procesos son cruciales para estimar el agua que consigue llegar al piso forestal o se evapora (Momolli et al., 2019; Souza et al., 2019); sin embargo, son pocos los estudios desarrollados en el trópico que investigan la repartición de la lluvia en esas situaciones.

En América tropical y subtropical, desde México hasta el sur de Brasil, dos leguminosas de crecimiento rápido conocidas como tambor (*Schizolobium parahyba* [Vell.] S. F. Blake) y samán (*Samanea saman* [Jacq.] Merrill) se han explotado para diversos usos; por ejemplo, en Brasil existe interés reciente en *S. parahyba* para la obtención de celulosa y papel, tanto como plantación pura o en los sistemas agroforestales, pues la especie es tolerante a la baja fertilidad y fuerte acidez natural del suelo (Barroso et al., 2018). En los sistemas silvopastoriles, las vainas de *S. saman* son un suplemento dietario en la alimentación de rumiantes o aves de corral, en especial, durante los periodos secos. Debido a su gran porte, *S. saman* proporciona un buen porcentaje de sombra, siendo de interés también en la arborización urbana por su atractivo visual (Vinodhini & Rajeswari, 2018).

El presente estudio tuvo como objetivo monitorear durante un año la repartición de lluvia en una parcela experimental con reforestación usando *S. parahyba* y *S. saman*, y determinar cómo los posibles cambios de la estructura del dosel se relacionan con la dinámica de interceptación de las precipitaciones; es decir, la precipitación interna y escurrimiento fustal.

Materiales y métodos

Sitio experimental

El área experimental se localiza en el centro de investigación La Suiza de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), municipio de Rionegro, departamento de Santander, región Andina de Colombia (7° 22' 10" N, 73° 10' 39" O; 550 m de elevación). Esta región típica del clima tropical ecuatorial (Af) posee un régimen bimodal de las precipitaciones. Los registros históricos de 1989 a 2018 indican, en promedio, 27.8 ± 0.5 °C y 1962 ± 281 mm·año⁻¹ (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2022).

Monitoreo de parámetros hidrometeorológicos

La precipitación en abierto o incidente, la precipitación interna también conocida como directa y el escurrimiento fustal se monitorearon del 15 febrero del 2019 al 15 febrero 2020 para *S. parahyba* (4.4-5.4 años) y del 1 julio del 2020 al 30 junio del 2021 para *S. saman* (5.8-6.8 años), en una parcela de 1000 m² por especie.

precipitation (mm) was estimated through the mean of three 11.4 cm diameter PVC collectors at 1.3 m above the ground, according to the methodology of Ferreto et al. (2021), while for *S. saman*, records were taken from a mobile weather station (Watchdog 2900ET) (Figure 1A and 1C). Both measuring instruments were installed in a clear area 500 m from the experimental plot.

The throughfall was collected in the central area of each plot and under the canopy using four 10.5 cm wide x 312 cm long x 7 cm high linear PVC rain gauges, 60 cm above the ground and with a slope of 7 %. Two rain gauges were installed in the furrow position (Figure 1B) and two between the tree furrows (Figure 1D). The amount of rainfall was calculated by dividing the volume of water collected (L) by the collector area (m²).

Stemflow was quantified in three (*S. parahyba*) and five (*S. saman*) trees similar to the mean DBH value of the plot. For the selected tree, a 1 in (2.54 cm) plastic hose was installed 1.3 m above the ground spirally, cut longitudinally and sealed with silicone, rounding at least one turn of the stem (Figure 1B and 1D). The water from stemflow was drained by the hose and stored in 15 L collectors. The volumes of stemflow (L) were divided by the projected crown area (m²) of each tree, calculated from eight directional crown radii (Tonello et al., 2014). Because of restrictions on travel to the experimental site, throughfall and stemflow were quantified simultaneously on a weekly basis to obtain the monthly accumulation; that is, a field collection could include one or several rainfall events.

Net precipitation corresponded to the sum of water runoff down the stem and throughfall in each forest formation, and monthly interception losses were the difference between throughfall and net precipitation.

Canopy structure analysis

In the same plot of the hydrometeorological monitoring and another plot located at 500 m with the same size, planting distance and age, hemispheric photographs were taken by using a fisheye lens - 180° attached to the camera of an Android 6.0 phone. The position leveled with a fixed support and defined in the central area of each plot at 1.3 m height was georeferenced with GPS; magnetic north corresponded to the top of the photograph. The activity was carried out every two weeks on a day with uniformly cloudy skies and low wind speed, avoiding exposure of sunlight to the lens.

A total of 46 high-resolution (3264 x 2448 megapixel) hemispheric images were totaled per species and saved in JPEG format during the 12 months of monitoring (*S. parahyba* = February 15th 2019 to February 15th 2020

Las plántulas de seis meses de edad producidas a partir de semilla comercial se establecieron en septiembre del 2014 con una densidad de siembra de 5 m x 5 m (400 árboles-ha⁻¹). Las variables de sobrevivencia, diámetro a la altura del pecho (DAP: 1.3 m sobre el nivel del suelo), altura total y al inicio de la copa, área de la proyección de copa, ancho del dosel del árbol y textura de la corteza se obtuvo en el inventario forestal de las parcelas. La altura total se calculó con clinómetro (Pm-5/360 P, Suunto) y el DAP se midió con cinta diamétrica. En el monitoreo del *S. parahyba*, la precipitación incidente (mm) se estimó a través de la media de tres colectores PVC de 11.4 cm de diámetro a 1.3 m sobre el suelo, conforme la metodología de Ferreto et al. (2021), mientras que para *S. saman*, los registros se obtuvieron a partir de una estación climática móvil (Watchdog 2900ET) (Figura 1A y 1C). Ambos instrumentos de medición se instalaron en área despejada a 500 m de la parcela experimental.

En el área central de cada parcela y debajo del dosel, la precipitación interna se colectó mediante cuatro pluviómetros lineales PVC de 10.5 cm ancho x 312 cm largo x 7 cm alto, a 60 cm sobre el suelo y con pendiente del 7 %. Dos pluviómetros se instalaron en la posición del surco (Figura 1B) y dos entre los surcos de los árboles (Figura 1D). La cantidad de lluvia se calculó al dividir el volumen del agua colectada (L) entre el área del colector (m²).

El escurrimiento fustal se cuantificó en tres (*S. parahyba*) y cinco (*S. saman*) árboles similares al valor DAP medio de la parcela. En el árbol seleccionado se instaló una manguera plástica de 1 in (2.54 cm) a 1.3 m encima del suelo en espiral, cortada longitudinalmente y sellada con silicona, completando al menos una vuelta al fuste (Figura 1B y 1D). El agua escurrida por el fuste se drenó por la manguera y se almacenó en colectores de 15 L. Los volúmenes de escurrimiento por el fuste (L) se dividieron por el área de copa (m²) proyectada de cada árbol, calculada a partir de ocho radios de copa direccionales (Tonello et al., 2014). Debido a las restricciones de desplazamiento al sitio experimental, la precipitación interna y el escurrimiento fustal se cuantificaron simultáneamente con periodicidad semanal, para así obtener el acumulado mensual; es decir, una colecta en campo pudo incluir uno o varios eventos de lluvia.

La precipitación efectiva correspondió a la suma del agua escurrida por los fustes y la precipitación interna en cada formación forestal, y las pérdidas por interceptación mensual se obtuvieron por la diferencia entre la precipitación incidente y precipitación efectiva.

Evaluación de la estructura del dosel

En la misma parcela del monitoreo hidrometeorológico y otra localizada a 500 m con el mismo tamaño, distancia de siembra y edad, se capturaron fotografías



Figure 1. Annual monitoring of open precipitation (A and C) and throughfall and stemflow (B and D) of *Schizolobium parahyba* and *Samanea saman* in Rionegro, Santander, Colombia.

Figura 1. Ilustración del monitoreo anual de la precipitación incidente (A y C) y precipitación interna y escurrimiento fustal (B y D) de *Schizolobium parahyba* y *Samanea saman* en Rionegro, Santander, Colombia.

and *S. saman* = July 1st 2020 to June 30th 2021). These were analyzed with the free software GLA 2.0 (Frazer et al., 1999) adjusting the regions to 16 azimuth and 9 zenith. Using the procedure of classifying the photograph between white (sky) and black (non-sky or vegetation, both foliage and wood) known as ‘binarization’, the same experienced user (first author) determined the best grayscale threshold for each of the hemispheric photographs. The software estimated the leaf area index (LAI, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) and canopy openness (CO, %). The results of the two measurements recorded per month were averaged to determine the mean monthly value.

Statistical analysis

Based on monthly records, annual precipitation distribution data for each species were distributed in a rainy period (March to May and September to November) and dry period (June to August and December to February) and compared using the parametric t-student test, once the assumptions of normality (Shapiro-Wilk test) and homoscedasticity of variances (Levene’s test) were fulfilled. A linear regression analysis was carried out using the

hemisféricas acoplando un lente *fish-eye* - 180° a la cámara de un teléfono Android 6.0. La posición nivelada con un soporte fijo y definida en el área central de cada parcela a 1.3 m de altura fue georreferenciada con GPS; el norte magnético correspondió a la parte superior de la fotografía. La actividad se realizó cada dos semanas procurando un día con cielo nublado uniforme y baja velocidad del viento evitando la exposición de la luz solar al lente.

Durante los 12 meses de monitoreo (*S. parahyba* = 15 febrero del 2019 al 15 febrero del 2020 y *S. saman* = 1 julio del 2020 al 30 junio del 2021) se tomaron 46 fotografías hemisféricas de alta resolución (3264 x 2448 megapíxeles) por especie que se guardaron en formato JPEG. Estas se analizaron con el *software* gratuito GLA 2.0 (Frazer et al., 1999) ajustando las regiones a 16 azimut y 9 zenit. Durante el procedimiento de clasificación de la fotografía entre blancos (cielo) y negros (no cielo o vegetación, tanto follaje como madera) conocido como ‘binarización’, un mismo usuario experimentado (primer autor) determinó el mejor umbral en la escala de grises para cada una de las fotografías hemisféricas. El *software* estimó el índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)

accumulated monthly data for the 12 months per species in order to identify a possible linear effect of throughfall, stemflow and net precipitation with respect to open precipitation. Finally, Pearson's correlation was used to analyze the relationship of canopy openness and monthly LAI with throughfall, stemflow, interception losses and net precipitation as a percentage of monthly open precipitation. All analyses were performed with the SAS 9.4 statistical program at 5 % significance.

Results

Table 1 shows the information collected from the forest inventory of the hydrometeorological monitoring plots of *S. parahyba* and *S. saman*. Open rainfall was similar between the two monitoring periods. The periods considered rainy (March to May and September to November) totaled 1292 mm for *S. parahyba* and 1482 mm for *S. saman*, 4.3 and 19.7 % higher, respectively, than the historical average for the region (Figure 2).

The lowest contribution to net precipitation was for *S. parahyba* with 78.3 % of the open precipitation, where throughfall and stemflow corresponded to 77.5 and 0.46 %, respectively (Table 2). Although 57 % of the total was concentrated in the rainy period, throughfall as a percentage of open precipitation was slightly higher ($P = 0.0107$) during the dry versus rainy period (79.6 % versus 76.0 %, respectively). Stemflow had no significant differences ($P = 0.5738$) between the two periods (46 %). Interception losses ranged from 20.5 to 24.8 %, with a higher percentage in the rainy period ($P = 0.0106$).

For *S. saman*, the net precipitation corresponded to 84.8 %, distributed in 84.7 % of throughfall and 0.06 % of stemflow. Between periods, throughfall had a higher contribution ($P = 0.0147$) during the dry period compared to the rainy period. Stemflow had the opposite behavior ($P = 0.0479$). Interception losses ranged from 12.8 to 16.3 %, in relation to open precipitation, with a higher contribution during the

y apertura del dosel (AD, %). Los resultados de las dos mediciones registradas por mes se promediaron para obtener el valor medio mensual.

Análisis estadístico

Con base en los registros mensuales, los datos de la repartición de la precipitación incidente anual de cada especie se distribuyeron en un periodo lluvioso (marzo a mayo y septiembre a noviembre) y seco (junio a agosto y diciembre a febrero) y se compararon mediante la prueba paramétrica t-student, una vez que se atendieron los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homocedasticidad de las varianzas (prueba de Levene). Con el fin de identificar un posible efecto lineal de la precipitación interna, escurrimiento fustal y precipitación efectiva en función de la precipitación incidente, los datos mensuales acumulados de los 12 meses por especie se sometieron a un análisis de regresión lineal. Finalmente, se usó la correlación de Pearson para analizar la relación de la apertura del dosel y el IAF mensual con la precipitación interna, escurrimiento fustal, pérdidas por interceptación y precipitación efectiva, como porcentaje de la precipitación incidente mensual. Todos los análisis se realizaron con el programa estadístico SAS 9.4 al 5 % de significancia.

Resultados

La información obtenida del inventario forestal de las parcelas de monitoreo hidrometeorológico de *S. parahyba* y *S. saman* se muestra en el Cuadro 1. La precipitación incidente fue similar entre los dos periodos de monitoreo. Los meses considerados de lluvia (marzo a mayo y septiembre a noviembre) sumaron 1292 mm para *S. parahyba* y 1482 mm para *S. saman*, superior en 4.3 y 19.7 %, respectivamente, a la media histórica de la región (Figura 2).

La menor contribución para la precipitación efectiva fue observada en *S. parahyba* con 78.3 % de la precipitación incidente, donde la precipitación

Table 1. Variables recorded in the hydrometeorological monitoring plot of *Schizolobium parahyba* and *Samanea saman* at 4.4 and 5.8 years of planting, respectively, in Rionegro, Santander, Colombia.

Cuadro 1. Variables obtenidas en la parcela de monitoreo hidrometeorológico de *Schizolobium parahyba* y *Samanea saman* a los 4.4 años y 5.8 años de plantación, respectivamente, en Rionegro, Santander, Colombia.

Species/ Especie	Survival/ Sobrevivencia (%)	DBH/DAP (cm)	Height/ Altura (m)	ICH/AIC (m)	CPA/APC (m ²)	Ratio/ Relación A:AN	Bark texture/ Textura de corteza
<i>S. parahyba</i>	93.9	19.2 ± 3.8	20.6 ± 2.6	7.1 ± 2.4	67.3 ± 30.6	2.4 ± 0.5	Smooth/lisa
<i>S. saman</i>	100	19.4 ± 3.0	13.6 ± 1.9	3.6 ± 0.8	86.2 ± 27.5	1.3 ± 0.3	Rough/rugosa

DBH = diameter at breast height (1.3 m above the ground), ICH = initial crown height, CPA = tree crown projection area, A:AN = ratio of tree canopy height to tree canopy width. ± standard deviation of the mean.

DAP = diámetro a la altura de pecho (1.3 m encima del suelo), AIC = altura inicio de copa, APC = área de la proyección de la copa, A:AN = relación entre la altura y ancho del dosel del árbol. ± desviación estándar de la media.

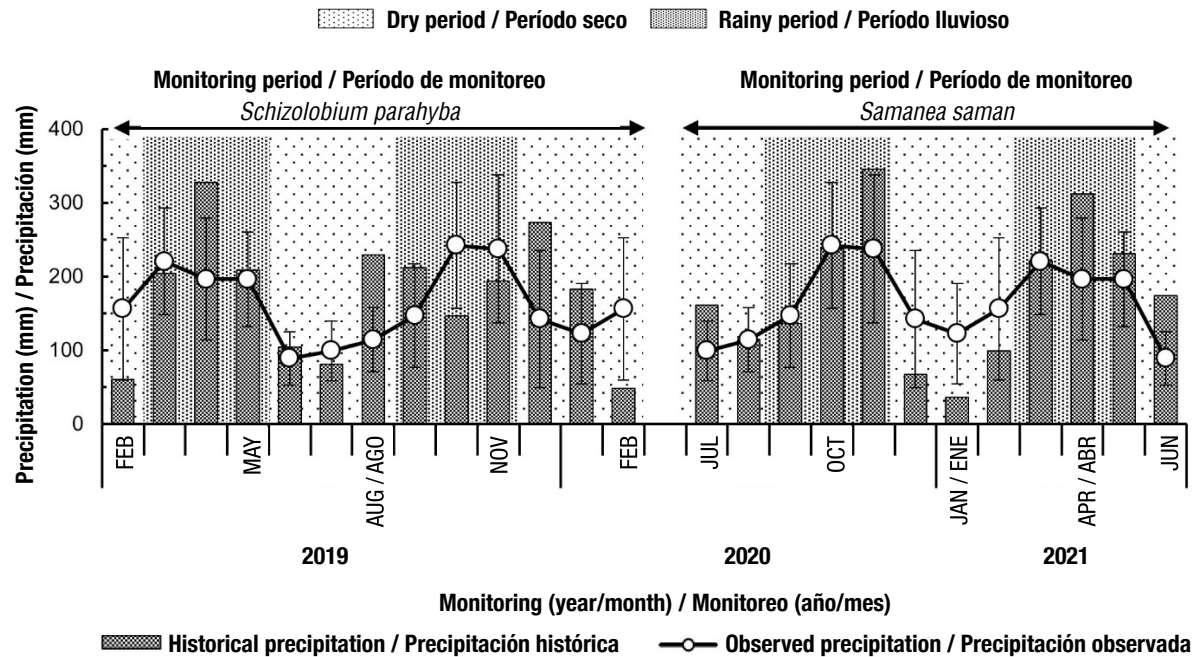


Figure 2. Monthly values of historical (1983-2018) and observed (2019-2021) precipitation during the annual monitoring period of *Schizolobium parahyba* and *Samanea saman* in Rionegro, Santander, Colombia. Variation bars represent the standard deviation of historical precipitation.

Figura 2. Valores mensuales de la precipitación histórica (1983-2018) y observada (2019-2021) durante el periodo de monitoreo anual de *Schizolobium parahyba* y *Samanea saman* en Rionegro, Santander, Colombia. Las barras de variación representan la desviación estándar de la precipitación histórica.

Table 2. Cumulative values of throughfall (Tf), stemflow (Sf), interception losses (I) and net precipitation (Np) in relation (%) to open precipitation (P) during annual monitoring of *Schizolobium parahyba* and *Samanea saman* in Rionegro, Santander, Colombia.

Cuadro 2. Valores acumulados de precipitación interna (Pi), escurrimiento fustal (Ef), pérdidas por interceptación (I) y precipitación efectiva (Pe) en relación (%) con la precipitación incidente (P) durante el monitoreo anual realizado en *Schizolobium parahyba* y *Samanea saman* en Rionegro, Santander, Colombia.

Species/ Especie	Period/ Periodo	P (mm)	Tf/Pi		Sf/Ef		Np/Pe		I	
			(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
<i>S. parahyba</i>	rainy period/ lluvioso	1292	982	76.0 b	5.9	0.46 ns	988	76.5 b	304	23.5 a
	dry period/ seco	978	779	79.6 a	4.5	0.46 ns	783	80.0 a	195	20.0 b
	total per year/ total anual	2270	1761	77.5	10.5	0.46	1771	78.3	499	22.0
<i>S. saman</i>	rainy period/ lluvioso	1482	1239	83.6 b	0.95	0.12 a	1240	83.7 b	242	16.3 a
	dry period/ seco	652	568	87.1 a	0.26	0.03 b	568	87.2 a	84	12.8 b
	total per year/ total anual	2134	1807	84.7	1.21	0.06	1808	84.7	326	15.3

Means followed by different letters in the columns indicate significant differences ($P < 0.05$) between the rainy and dry periods, according to the t-student test ($P = 0.05$). ns = not significant.

Medias seguidas por letras distintas en las columnas indican diferencias significativas ($P < 0.05$) entre el periodo lluvioso y seco, de acuerdo con la prueba t-student ($P = 0.05$). ns = no significativo.

rainy period ($P = 0.0106$). This increase of 27.5 % was relatively stronger than that observed in *S. parahyba* (+17.5 %; Table 2). Statistically, differences in annual net precipitation were found between the two periods.

According to Figure 3, the two species had a strong positive and significant linear positive response of throughfall and net precipitation ($R^2 > 0.93$) with respect to open precipitation, but the response was low in interception losses (R^2 between 0.33 to 0.58). Stemflow also had a positive linear response with $R^2 = 0.74$.

Canopy structure assessment

Figure 4 shows the analysis of hemispheric images with a marked monthly variation of canopy structure in both species. In the case of *S. parahyba*, in February 2019, canopy openness started with a low value (38 %), but gradually increased to reach a maximum in April 2019

interna y el escurrimiento fustal correspondieron al 77.5 y 0.46 %, respectivamente (Cuadro 2). A pesar de que 57 % del total estuvo concentrado en el periodo lluvioso, la precipitación interna como porcentaje de la precipitación incidente fue ligeramente mayor ($P = 0.0107$) durante el período seco frente al lluvioso (79.6 % versus 76.0 %, respectivamente). El escurrimiento fustal no tuvo diferencias significativas ($P = 0.5738$) entre ambos periodos (46 %). Las pérdidas por interceptación variaron entre 20.5 a 24.8 %, con mayor porcentaje en el periodo lluvioso ($P = 0.0106$).

En *S. saman*, la precipitación efectiva correspondió al 84.8 %, distribuido en 84.7 % de precipitación interna y 0.06 % del escurrimiento fustal. Entre los periodos, la precipitación interna tuvo mayor contribución ($P = 0.0147$) durante el periodo seco que en el lluvioso. El escurrimiento fustal tuvo comportamiento inverso ($P = 0.0479$). Las pérdidas por interceptación variaron

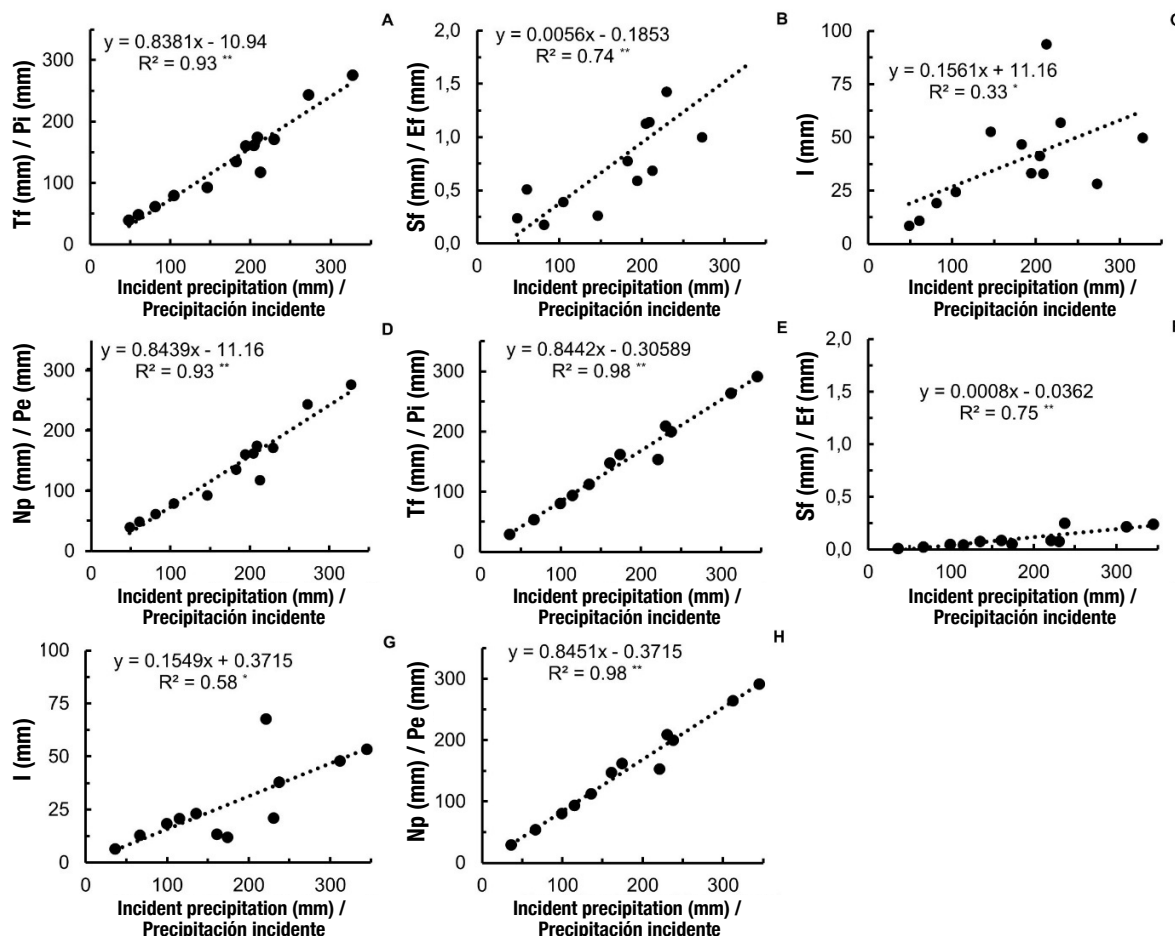


Figure 3. Linear regression between open precipitation and throughfall (Tf), stemflow (Sf), interception losses (I) and net precipitation (Np) in *Schizolobium parahyba* (A, B, C and D) and *Samanea saman* (E, F, G and H) in Rionegro, Santander, Colombia. Statistical significance: $^*P < 0.05$ and $^{**}P < 0.01$.

Figura 3. Regresión lineal entre la precipitación incidente y la precipitación interna (Pi), escurrimiento fustal (Ef), pérdidas por interceptación (I) y precipitación efectiva (Pe) en *Schizolobium parahyba* (A, B, C y D) y *Samanea saman* (E, F, G y H) en Rionegro, Santander, Colombia. Significancia estadística: $^*P < 0.05$ y $^{**}P < 0.01$.

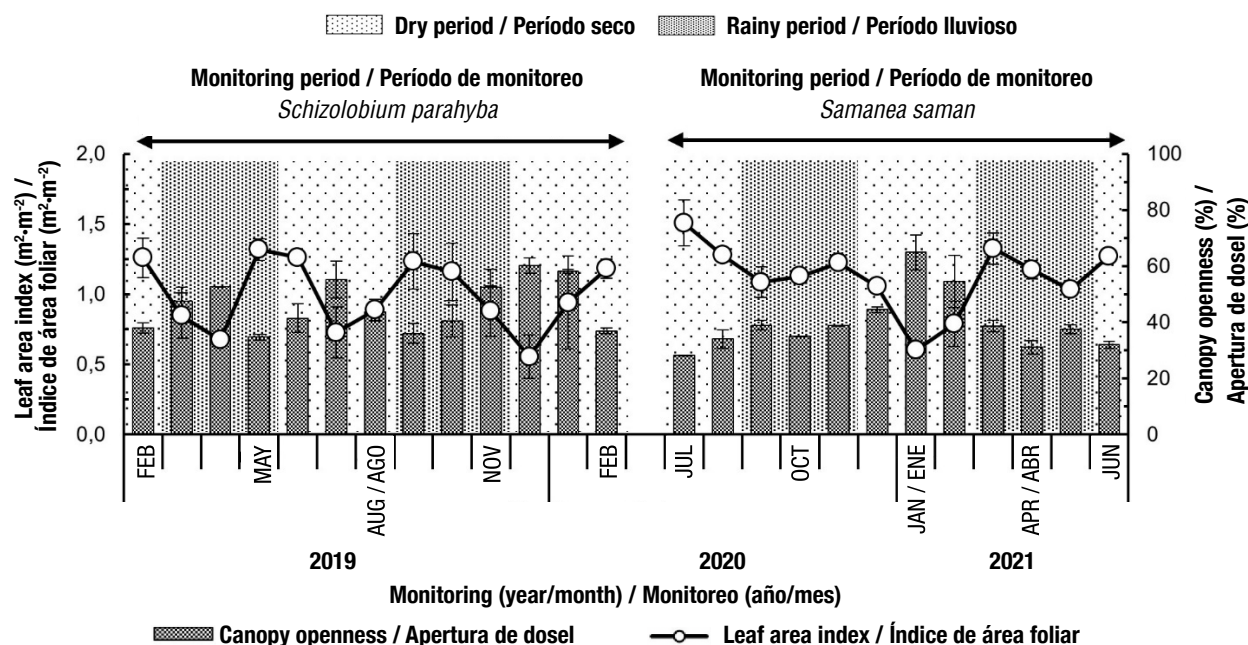


Figure 4. Monthly values of leaf area index and canopy openness during the annual monitoring period in *Schizolobium parahyba* and *Samanea saman* in Rionegro, Santander, Colombia. Variation bars represent the standard error of the mean ($n = 2$).

Figura 4. Valores mensuales del índice de área foliar y apertura del dosel durante el periodo de monitoreo anual en *Schizolobium parahyba* y *Samanea saman* en Rionegro, Santander, Colombia. Las barras de variación representan el error estándar de la media ($n = 2$).

(52.6 %). In total, four minimum and three maximum peaks occurred during the monitoring year (mean = 46.0 ± 8.9 %). The behavior of IAF was inverse; that is, at the start of monitoring in February 2019 it was a maximum ($1.26 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; Figure 5A) dropping to a minimum in April 2019 ($0.68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; Figure 5B). Mean was $0.99 \pm 0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

The pattern was different in *S. saman* because starting in July 2020, the value of canopy openness was minimal (28.2 %) and remained stable for a few months, but from December 2020 (44.5 %) it increased until reaching a single maximum peak in January 2021 (64.9 %). The mean was 39.8 ± 10.5 %. The LAI started with a maximum value in July 2020 ($1.51 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; Figure 5C) and decreased to a minimum in January ($0.60 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; Figure 5D). The mean was $1.51 \pm 0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. According to Table 3, only this species had a negative linear correlation between canopy openness and throughfall and open precipitation ($r = -0.64$, $P = 0.02$), and a positive linear correlation between canopy openness and interception losses ($r = 0.64$, $P = 0.02$); however, in these correlations, the linear regression analysis showed null significance and R^2 values less than 0.12.

Discussion

The values of throughfall, interception losses and stemflow, as a fraction of open precipitation, varied widely among species; the results are similar to those

entre 12.8 a 16.3 %, en relación con la precipitación incidente, con mayor registro en el periodo lluvioso ($P = 0.0106$). Dicho aumento del 27.5 % fue relativamente más fuerte que lo observado en *S. parahyba* (+17.5 %; Cuadro 2). Estadísticamente, se encontraron diferencias en la precipitación efectiva anual entre los dos periodos.

De acuerdo con la Figura 3, las dos especies tuvieron una fuerte respuesta lineal positiva y significativa de la precipitación interna y la efectiva ($R^2 > 0.93$) con respecto a la precipitación incidente, pero la respuesta fue baja en las pérdidas por interceptación (R^2 entre 0.33 a 0.58). El escurrimiento fustal también tuvo una respuesta positiva lineal con $R^2 = 0.74$.

Evaluación de la estructura del dosel

La Figura 4 muestra el análisis de las fotografías hemisféricas con una marcada variación mensual de la estructura del dosel en ambas especies. En el caso del *S. parahyba*, en febrero del 2019, la apertura del dosel inició con un valor bajo (38 %), pero incrementó paulatinamente hasta alcanzar un máximo en abril 2019 (52.6 %). En total se presentaron cuatro picos mínimos y tres máximos durante el año de monitoreo (media = 46.0 ± 8.9 %). El comportamiento del IAF fue inverso; es decir, al iniciar el monitoreo en febrero 2019 fue máximo ($1.26 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; Figura 5A) cayendo a un mínimo en abril 2019 ($0.68 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; Figura 5B). La media fue de $0.99 \pm 0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

Table 3 Spearman correlation coefficients between precipitation variables versus leaf area index (LAI) and canopy openness (CO) of *Schizolobium parahyba* and *Samanea saman* in Rionegro, Santander, Colombia.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Spearman entre las variables de precipitación versus índice de área foliar (IAF) y apertura dosel (AD) de *Schizolobium parahyba* y *Samanea saman* en Rionegro, Santander, Colombia.

Species/ Especie	Canopy structure/ Estructura del dosel	Throughfall/ Precipitación interna	Stemflow/ Escurrimiento fustal	Interception losses / Pérdidas por interceptación	Net precipitation/ Precipitación efectiva
		(mm)			
<i>S. parahyba</i>	LAI (m ² .m ⁻²)	-0.28 (P = 0.35)	0.13 (P = 0.68)	0.28 (P = 0.35)	-0.28 (P = 0.35)
	CO (%)	0.19 (P = 0.54)	-0.18 (P = 0.56)	-0.19 (P = 0.54)	0.19 (P = 0.54)
<i>S. saman</i>	LAI (m ² .m ⁻²)	0.22 (P = 0.48)	0.25 (P = 0.44)	-0.22 (P = 0.48)	0.22 (P = 0.48)
	CO (%)	-0.64 (P = 0.02)	-0.22 (P = 0.50)	0.64 (P = 0.02)	-0.64 (P = 0.02)

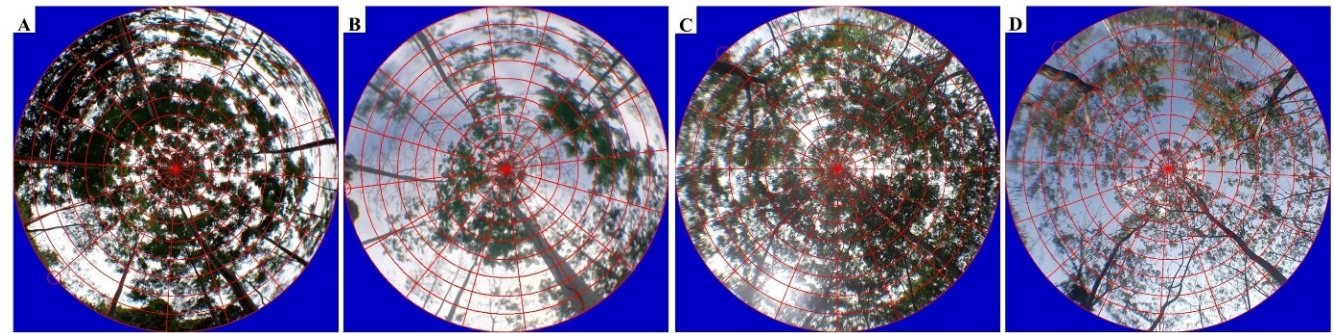


Figure 5. Processing of hemispheric images using GLA 2.0 software for annual monitoring of canopy structure in *Schizolobium parahyba* (maximum leaf area index in May 2020 [A] and minimum in February 2021 [B]) and *Samanea saman* (maximum leaf area index in July 2020 [C] and minimum in January 2021 [D]) in Rionegro, Santander, Colombia.

Figura 5. Procesamiento de fotografías hemisféricas mediante el software GLA 2.0 para el monitoreo anual de la estructura del dosel en *Schizolobium parahyba* (índice de área foliar máximo en mayo 2020 [A] y mínimo en febrero 2021 [B]) y *Samanea saman* (índice de área foliar máximo en julio 2020 [C] y mínimo en enero 2021 [D]) en Rionegro, Santander, Colombia.

reported by Freitas et al. (2016) and Limin et al. (2015) in tropical and subtropical deciduous forest regions, who reported values of 70 to 90 % of throughfall, 10 to 30 % of interception losses and 1 to 3 % of stemflow. In the context of the two plantations, assuming the same meteorological conditions and amount of throughfall, although the canopy of *S. parahyba* intercepted more rainfall, it also had greater volumes of water reaching the soil as stemflow (22.7 %, when compared to *S. saman* (15.3 %). These differences could have been caused, in addition to the intensity and frequency of rainfall in each monitoring period, by the nature of the stem bark and the architecture of the tree (Tonello et al., 2021b). Regarding DBH, there were no significant differences between the two species (19.4 a 21.6 cm; $t = 0.2857$) for the selected trees. These variables have been shown to influence stemflow among trees (Ferreto et

El patrón fue diferente en *S. saman* porque iniciando en julio 2020, el valor de la apertura del dosel fue mínima (28.2 %) y se mantuvo estable unos meses, pero a partir de diciembre 2020 (44.5 %) incrementó hasta alcanzar un pico máximo único en enero 2021 (64.9 %). La media fue de 39.8 ± 10.5 %. El IAF inició con un valor máximo en julio 2020 (1.51 m².m⁻²; Figura 5C) y disminuyó al mínimo en enero 2021 (0.60 m².m⁻²; Figura 5D). La media fue de 1.51 ± 0.2 m².m⁻². De acuerdo con el Cuadro 3, únicamente en esta especie se observó correlación lineal negativa entre la apertura del dosel con la precipitación interna y precipitación efectiva ($r = -0.64$, $P = 0.02$), y una correlación lineal positiva entre la apertura del dosel y las pérdidas por interceptación ($r = 0.64$, $P = 0.02$); sin embargo, en estas correlaciones, el análisis de regresión lineal mostró nula significancia y valores de R² menores de 0.12.



Figure 6. Illustration of bark texture, stem straightness and initiation of branching in *Schizolobium parahyba* (A and B) and *Samanea saman* (C and D) in Rionegro, Santander, Colombia.

Figura 6. Ilustración de textura de la corteza, rectitud del fuste e inicio de la ramificación en *Schizolobium parahyba* (A y B) y *Samanea saman* (C y D) en Rionegro, Santander, Colombia.

al., 2021; Tonello et al., 2021b). This suggests that the smooth bark surface of *S. parahyba*, a more rectangular crown and a straight stem with branching beginning in the last third (Figure 6A and 6B) played a role in the observed differences. In contrast, the surface of *S. saman* has rough or scaly bark, a squarer crown, a less erect stem and the beginning of branching in the first third (Figure 6C and 6D). In the 30 most common species of the Cerrado savanna (Brazil), Tonello et al. (2021b) found that the volume of stemflow, as a proportion of open precipitation, increased when the bark surface was smooth and the canopy height-canopy width ratio was greater, i.e., trees with steeper branches.

Stemflow is a particularly important process in anthropic environments, because it allows rainwater to be channeled to the soil with a lower velocity, which promotes infiltration and reduction of soil erosion by runoff. The difference in hydrological processes between the two species studied reaffirm that the structure of the trees defines the preferential water flow paths connecting the canopy and the deeper understory (Metzger et al., 2021).

On the other hand, although stemflow as a percentage of open precipitation was lower versus the other components in the two species (<0.5 %, Table 2), these small volumes are an important concentrated supplement of water and nutrients to the forest floor (Niemeyer et al., 2014; Tonello et al., 2021a), contaminants (Ponette-González et al., 2020), inorganic matter (Cayuela et al., 2019) and metazoans (Guidone et al., 2021; Lima et al., 2022; Ptatscheck et al., 2018). In the case of *S. parahyba*, a recent study noted that about 16 individuals·L⁻¹ of arthropods (Insecta +

Discusión

Los valores de precipitación interna, pérdidas por interceptación y escurrimiento fustal, como fracción de la precipitación incidente, variaron ampliamente entre las especies; los resultados se asemejaron a los reportados por Freitas et al. (2016) y Limin et al. (2015) en regiones del bosques tropical y subtropical caducifolio, quienes señalaron valores de 70 a 90 % de precipitación interna, 10 a 30 % de pérdidas por interceptación y 1 a 3 % de escurrimiento fustal. En el contexto de las dos plantaciones, suponiendo las mismas condiciones meteorológicas y cantidad de precipitación incidente, aunque el dosel del *S. parahyba* interceptó mayor cantidad de lluvia tuvo también mayores volúmenes de agua que alcanzaron el suelo en forma de escurrimiento fustal (22.7 %, cuando se compara con *S. saman* (15.3 %). Estas diferencias pudieron ser ocasionadas, además de la intensidad y frecuencia de las precipitaciones en cada periodo de monitoreo, por la naturaleza de la corteza del fuste y la arquitectura del árbol (Tonello et al., 2021b). Con respecto al DAP, no hubo diferencias significativas entre las dos especies (19.4 a 21.6 cm; $t = 0.2857$) para los árboles seleccionados. Se ha demostrado que estas variables influyen en el escurrimiento fustal entre los árboles (Ferreto et al., 2021; Tonello et al., 2021b). Lo anterior sugiere que la superficie lisa de la corteza de *S. parahyba*, copa más rectangular y un fuste recto con inicio de la ramificación en el último tercio (Figura 6A y 6B) jugaron un rol en las diferencias observadas. Contrariamente, la superficie de *S. saman* presenta la corteza rugosa o escamosa, copa más cuadrada, un fuste menos erecto e inicio de ramificación en el primer tercio (Figura 6C y 6D). En las 30 especies más

Collembola + Arachnida) are transported by stemflow (Lima et al., 2022). This is an important aspect, since the channels opened by these arthropods can affect water absorption and percolation rates, soil aeration, soil fauna community structure living near tree stems, and cause potential indirect effects of stemflow on this near-stem community, such as soil pH (Jozwiak et al., 2013; Kaneko & Kofuji, 2000).

In *S. parahyba*, Pineda-Herrera et al. (2012) found that leaf fall was negatively related to precipitation, while the opposite was true for leaf sprouting in the rainforest of Oaxaca, Mexico, characterized by seasonal rainfall. In the present study, it was found that the means of LAI ($1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; 0.13 a $0.9 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) and canopy openness (50 %; between 42 and 85 %) in *S. parahyba* were similar to those found during the middle of the dry period for a deciduous forest in Brazil (Freitas et al., 2016). Therefore, it becomes evident for future studies to monitor the phenology of the species.

High percentages of interception by the forest canopy are associated with high values of LAI (Ferreto et al., 2021), as occurred in *S. saman*, whose canopy was denser for more months compared to *S. parahyba* (Table 3; Figure 4). According to Kaushal et al. (2017) and Tonello et al. (2021a), wind speed and direction, phenology, leaf shape and orientation, branching pattern and angle, and other canopy properties, which were not assessed in the present study, also influence precipitation redistribution. This fact could justify the lack of correlation observed in *S. parahyba*. Limin et al. (2015) found no significant correlation between internal precipitation and canopy openness of *Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & L. M. Perry, with very low R^2 values (0.05). The same occurred in *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cambage and *Eucalyptus dunnii* Maiden, between throughfall and LAI with an R^2 less than 0.36 (Ferreto et al., 2021). The larger the tree canopy, the greater the rainfall catchment area; however, other mechanisms will influence the subsequent path of that intercepted portion.

Finally, it is important to highlight that, according to IDEAM (2015), 7.6 % (232 000 ha) of the land surface of the department of Santander presents severe (completely removed superficial soil horizons and exposed subsurface horizons) and very severe (total loss of superficial horizons and partial loss of subsurface soil horizons) erosion. Thus, studies and effective monitoring of hydrological processes, both in degraded areas and in the process of forest restoration (native or introduced) or even areas of forest overexploitation are of extreme importance and urgency, in order to support sustainable actions and soil and water conservation. This could minimize the severe stages of degradation that can also become irreversible, particularly in the

comunes de la sabana del Cerrado (Brasil), Tonello et al. (2021b) encontraron que el volumen del escurrimiento fustal, como proporción de la precipitación incidente, aumentó cuando la superficie de la corteza fue lisa y la relación altura-ancho del dosel fue mayor; es decir, árboles con ramas más inclinadas.

El escurrimiento fustal es un proceso particularmente importante en ambientes antrópicos, ya que permite que el agua de la lluvia sea canalizada para el suelo con una menor velocidad, lo que promueve la infiltración y reducción de la erosión del suelo por escorrentía. La diferencia de los procesos hidrológicos entre las dos especies estudiadas reafirma que la estructura de los árboles define los caminos de flujo preferencial de agua conectando el dosel y el subsuelo más profundo (Metzger et al., 2021).

Por otro lado, a pesar de que el escurrimiento fustal como porcentaje de la precipitación incidente fue menor frente a los otros componentes en las dos especies (<0.5 %, Cuadro 2), estos volúmenes pequeños son un suplemento concentrado importante de agua y nutrientes al suelo forestal (Niemeyer et al., 2014; Tonello et al., 2021a), contaminantes (Ponette-González et al., 2020), materia inorgánica (Cayuela et al., 2019) y metazoarios (Guidone et al., 2021; Lima et al., 2022; Ptatscheck et al., 2018). En el caso de *S. parahyba*, un estudio reciente apuntó que cerca de $16 \text{ individuos} \cdot \text{L}^{-1}$ de artrópodos (Insecta + Collembola + Arachnida) son transportados por el escurrimiento fustal (Lima et al., 2022). Este es un aspecto importante, puesto que los canales abiertos por esos artrópodos pueden afectar las tasas de absorción y percolación de agua, la aireación del suelo, estructura de la comunidad de la fauna del suelo que vive cerca de los troncos de los árboles, y causar efectos potenciales indirectos del flujo del tronco en esta comunidad cercana al fuste, como el pH del suelo (Jozwiak et al., 2013; Kaneko & Kofuji, 2000).

En *S. parahyba*, Pineda-Herrera et al. (2012) encontraron que la caída de hojas se relacionó negativamente con la precipitación, mientras para la brotación foliar sucedió lo contrario en la selva húmeda de Oaxaca, México, caracterizada por la estacionalidad de las lluvias. En el presente estudio, se constató que las medias del IAF ($1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; 0.13 a $0.9 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) y apertura del dosel (50 %; entre 42 y 85 %) en *S. parahyba* fueron parecidas a las encontradas durante la mitad del periodo seco para un bosque caducifolio en Brasil (Freitas et al., 2016). Por eso, se hace evidente en próximos estudios realizar monitoreos en la fenología de las especies.

Los porcentajes altos de interceptación por el dosel forestal son asociados con valores altos de IAF (Ferreto et al., 2021), como ocurrió en *S. saman*, cuyas copas fueron más densas durante más meses frente a

department of Santander and other tropical areas of the Andean region of Colombia.

Conclusions

The rainfall partitioning of each species shows different paths in the same studied environment, especially in relation to rainfall seasonality; however, the highest net precipitation was associated with the dry period in both species. Although *Samanea saman* had a higher leaf area index, reforestation resulted in lower rainfall interception, higher net precipitation volume and lower stemflow than *S. parahyba*. On the other hand, the dynamics of rainfall partitioning, especially the processes of throughfall and interception were correlated with canopy openness only for the *S. saman* population. This information reinforces the importance of studying the hydrological processes in reforestation environments considering the morphological structure of the species involved, as well as the seasonality of rainfall.

Acknowledgments

The authors would like to thank AGROSAVIA, attached to the Colombian Ministry of Agriculture and Rural Development (MADR), for funding this study as part of the research project “Planning and management strategies for forest plantations in agroecosystems in Colombia (code: 102-P1001200)” linked to AGROSAVIA’s Permanent Crops Innovation Network.

End of English version

References / Referencias

- Allen, S., Aubrey, D., Bader, M., Coenders-Gerrits, M., Friesen, J., Gutmann, E., Guillemette, F., Jiménez-Rodríguez, C., Keim, R. F., Klamerus-Iwan, A., Mendieta-Leiva, G., Porada, P., Qualls, R. G., Schilperoort, R., Stubbins, A., & Van Stan II, J. T. (2020). Key questions on the evaporation and transport of intercepted precipitation. In J. T. Van Stan II, E. Gutmann, & J. Friesen (Eds.), *Precipitation partitioning by vegetation* (pp. 269–280). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29702-2_16
- Barroso, D. G., Souza, M., Oliveira, T., & Siqueira, D. (2018). Growth of Atlantic Forest trees and their influence on topsoil fertility in the southeastern Brazil. *CERNE*, 24(4), 352–359. <https://doi.org/10.1590/01047760201824042605>
- Bessi, D., Dias, H., & Tonello, K. C. (2018). Rainfall partitioning in fragments of Cerrado vegetation at different stages of conduction of natural regeneration. *Árvore*, 42(2), e420215, 1–11. doi: 10.1590/1806-90882018000200015
- Cayuela, C., Levia, D. F., Latron, J., & Llorens, P. (2019). Particulate matter fluxes in a Mediterranean mountain forest: Interspecific differences between throughfall and stemflow in oak and pine stands. *Journal of Geophysical*

S. parahyba (Cuadro 3; Figura 4). De acuerdo con Kaushal et al. (2017) y Tonello et al. (2021a), la velocidad y dirección del viento, fenología, forma y orientación de las hojas, patrón y ángulo de ramificación, y otras propiedades del dosel, que no se evaluaron en el presente estudio, también influyen la redistribución de las precipitaciones. Este hecho podría justificar la falta de correlación observada en *S. parahyba*. Limin et al. (2015) no encontraron correlación significativa entre la precipitación interna y la apertura del dosel de *Syzygium aromaticum* (L.) Merr. & L. M. Perry, siendo los valores de R^2 muy bajos (0.05). Lo mismo ocurrió en *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage y *Eucalyptus dunnii* Maiden, entre la precipitación interna y el IAF con un R^2 menor de 0.36 (Ferreto et al., 2021). Cuanto mayor es la copa de los árboles, mayor es el área de captación de lluvia; no obstante, otros mecanismos influenciarán el camino posterior de esa porción interceptada.

Finalmente, es importante resaltar que, de acuerdo con el IDEAM (2015), 7.6 % (232 000 ha) de la superficie terrestre del departamento de Santander presenta grados de erosión severo (horizontes superficiales del suelo completamente removidos y horizontes subsuperficiales expuestos) y muy severo (pérdida total de los horizontes superficiales y pérdida parcial de los horizontes subsuperficiales del suelo). De ese modo, los estudios y el monitoreo efectivo de los procesos hidrológicos, tanto de áreas degradadas como en proceso de restauración forestal (nativa o introducida) o inclusive áreas de sobreexplotación forestal son de extrema importancia y urgencia, para el subsidio de acciones sustentables y de conservación del suelo y agua. Esto podría minimizar las etapas severas de degradación que pueden también volverse irreversibles, particularmente en el departamento de Santander y otras áreas tropicales de la región Andina de Colombia.

Conclusiones

La distribución de la lluvia de cada especie señala caminos diferentes en el mismo ambiente estudiado, especialmente en relación con la estacionalidad de las lluvias; sin embargo, la mayor precipitación efectiva se asoció con el periodo seco en ambas especies. Si bien, *Samanea saman* tuvo un índice de área foliar más alto, la reforestación provocó menor interceptación de lluvia, mayor volumen de precipitación efectiva y escorrentía por el tronco más baja que *S. parahyba*. Por otro lado, la dinámica de la repartición de la lluvia, en especial los procesos de precipitación interna e interceptación se correlacionaron con la apertura del dosel solamente en la población de *S. saman*. Esta información refuerza la importancia de investigar los procesos hidrológicos en los ambientes de reforestación considerando la estructura morfológica de las especies involucradas, así como la estacionalidad de las lluvias.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia*. IDEAM-MADS. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023648/Sintesis.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos [Conjunto de datos]. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Jozwiak, M. A., Kozłowski, R., & Jozwiak, M. (2013). Effects of acid rain stemflow of beech tree (*Fagus sylvatica* L.) on macro-pedofauna species composition at the trunk base. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(1), 149–157. <http://www.pjoes.com/pdf-88963-22822?filename=Effects%20of%20Acid%20Rain.pdf>
- Kaneko, N., & Kofuji, R. (2000). Effects of soil pH gradient caused by stemflow acidification on soil microarthropod community structure in a Japanese red cedar plantation: An evaluation of ecological risk on decomposition. *Journal of Forest Research*, 5(3), 157–162. <https://doi.org/10.1007/BF02762395>
- Kaushal, R., Kumar, A., Alam, N., Mandal, D., Jayaparkash, J., Tomar, M., Patra S., Gupta, A. K., Mehta, H., Panwar, P., Chaturvedi, O. P., & Mishra, P. (2017). Effect of different canopy management practices on rainfall partitioning in *Morus alba*. *Ecological Engineering*, 102, 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.029>
- Lima, M. T., Urso-Guimaraes, M. V., Van Stan, J. T., & Tonello, K. C. (2022). Stemflow metazoan transport from common urban tree species (São Paulo, Brazil). *Ecohydrology*, e2517. <https://doi.org/10.1002/eco.2517>
- Limin, S., Oue, H., Sato, Y., Budiasa, W., & Indra, B. (2015). Partitioning rainfall into throughfall and interception loss in Clove (*Syzygium aromaticum*) plantation in upstream Saba River Basin, Bali. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.036>
- Metzger, J., Filipzik, J., Michalzik, B., & Hildebrandt, A. (2021). Stemflow infiltration hotspots create soil microsites near tree stems in an unmanaged mixed beech *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 1–14. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.701293>
- Momolli, D., Schumacher, M., Viera, M., Ludvichak, A., Guimarães, C., & De Souza, H. (2019). Incident precipitation partitioning: throughfall, stemflow and canopy interception in *Eucalyptus dunnii* Stand. *Journal of Agricultural Science*, 11(5), 372–380. <https://doi.org/10.5539/jasv11n5p372>
- Niemeyer, R., Premier, K., Heinse, W., Chávez-Human, W., & DeClerck, F. (2014). Woody vegetation increases saturated hydraulic conductivity in dry tropical Nicaragua. *Vadose Zone Journal*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.2136/vzj2013.01.0025>
- Pereira, L., Balbinot, L., Lima, M., Bramorski, J., & Tonello, K. C. (2022). Aspects of forest restoration and hydrology: the hydrological function of litter. *Journal of Forestry Research*, 33, 543–552. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01365-1>
- Pineda-Herrera, E., Valdez-Hernández, J., & López-López, M. (2012). Fenología de *Schizolobium parahyba* y *Vochysia guatemalensis*

Agradecimientos

Los autores agradecen a AGROSAVIA adscrita al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR) por el financiamiento de este estudio como parte del proyecto de investigación “Estrategias de planificación y manejo de plantaciones forestales en agroecosistemas de Colombia (código: 102-P1001200)” vinculado a la Red de Innovación de Cultivos Permanentes de AGROSAVIA.

Fin de la versión en español

- Research – Atmospheres, 124(9), 5106–5116. <https://doi.org/10.1029/2019JD030276>
- Coenders-Gerrits, M., Schilperoort, B., & Jiménez-Rodríguez, C. (2020). Evaporative processes on vegetation: An inside look. In J. Van Staen, E. Gutmann, & J. Friesen (Eds.), *Precipitation partitioning by vegetation: A global synthesis precipitation* (pp. 35–48). Springer Nature.
- Ferreto, D., Reichert, J. M., Cavalcante, R., & Srinivasan, R. (2021). Rainfall partitioning in young clonal plantations *Eucalyptus* species in a subtropical environment, and implications for water and forest management. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(3), 474–484. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.01.002>
- Frazer, G., Canham, C., & Lertzman, K. (1999). *Gap Light Analyzer (GLA) (version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-color fisheye photographs* [software]. <https://www.caryinstitute.org/science/our-scientists/dr-charles-d-canham/gap-light-analyzer-gla>
- Freitas, J. P., Dias, J., Silva, E., & Tonello, K. C. (2016). Net precipitation in a semideciduous forest fragment in Viçosa city, MG. *Árvore*, 40(5), 793–801. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000500003>
- Friesen, J. (2020). Flow pathways of throughfall and stemflow through the subsurface. In J. Van Stan, E. Gutmann, & J. Friesen (Eds.), *Precipitation partitioning by vegetation* (pp. 215–228). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29702-2_13
- Guidone, M., Gordon, D. A., & Van Stan, J. T. (2021). Living particulate fluxes in throughfall and stemflow during a pollen event. *Biogeochemistry*, 153, 323–330. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00787-7>
- Hardwick, S., Toumi, R., Pfeifer, M., Turner, E., Nilus, R., & Ewers, R. (2015). The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.010>
- Huang, R., Jia, X., Ou, Y., Xu, M., Xie, P., & Su, Z. (2019). Monitoring canopy recovery in a subtropical forest following a huge ice storm using hemispherical photography. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(355), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7500-6>

- en una selva alta perennifolia de Oaxaca, México. *Botanical Sciences*, 90(2), 185 – 193. doi: 10.17129/botsci.483
- Ponette-González, A., Van Stan, J., & Magyar, D. (2020). Things seen and unseen in throughfall and stemflow. In J. Van Stan, E. Gutmann, & J. Friesen (Eds.), *Precipitation partitioning by vegetation - A global synthesis* (pp. 71 – 87). Springer Nature.
- Ptatscheck, C., Milne, P. C., & Traunspurger, W. (2018). Is stemflow a vector for the transport of small metazoans from tree surfaces down to soil? *BMC Ecology*, 18, 43. <https://doi.org/10.1186/s12898-018-0198-4>
- Sadeghi, S., Gordon, D., & Van Stan, J. (2020). A global synthesis of throughfall and stemflow hydrometeorology. In J. Van Stan, E. Gutmann, & J. Friesen (Eds.), *Precipitation partitioning by vegetation* (pp. 49 – 70). Springer Nature.
- SAS Institute Inc. (2013). *Statistical analysis system. The SAS system for Windows version 9.4* [software]. https://www.sas.com/es_mx/software/stat.html
- Souza, H., Momolli, D., Ludvichak, A., Schumacher, M., & Malheiros, A. (2019). Linear regression of incident precipitation explains the throughfall, stemflow and interception by the *Eucalyptus* canopy under different fertilization management. *Journal of Experimental Agriculture International*, 33(4), 1 – 11. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2019/v33i430147>
- Sun, J., Yu, X., Wang, H., Jia, G., Zhao, Y., Tu, Z., Den, W., Jia, J., & Chen, J. (2018). Effects of forest structure on hydrological processes in China. *Journal of Hydrology*, 561, 187 – 199. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.003>
- Tonello, K., Gasparoto, E., Shinzato, E., Valente, R., & Dias, H. (2014). Precipitação efetiva em diferentes formações florestais na floresta nacional de Ipanema. *Árvore*, 38(2), 383 – 393. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200020>
- Tonello, K., Rosa, A., Pereira, L., Matus, G., Guandique, M., & Navarrete, A. (2021a). Rainfall partitioning in the Cerrado and its influence on net rainfall nutrient fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 303, 1 – 12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108372>
- Tonello, K., Van Stan, J., Rosa, A., Balbinot, L., Pereira, L., & Bramorski, J. (2021b). Stemflow variability across tree stem and canopy traits in the Brazilian Cerrado. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308-309, 1 – 8. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108551>
- Van Stan, J., & Allen, S. (2020). What we know about stemflow's infiltration area. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 1 – 7. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00061>
- Vinodhini, S., & Rajeswari, D. (2018). Review on ethnomedical uses, pharmacological activity and phytochemical constituents of *Samanea saman* (Jacq.) Merr. rain tree. *Pharmacognosy Journal*, 10(2), 202 – 209. <https://doi.org/10.5530/pj.2018.2.35>
- Wang, J., Xiong, Q., Lin, Q., & Huang, H. (2018). Feasibility of using mobile phone to estimate forest leaf area index: a case study in Yunnan Pine. *Remote Sensing Letters*, 9(2), 180 – 188. doi: 10.1080/2150704X.2017.1399470
- Woodgate, W., Jones, S., Suarez, L., Hill, M., John, D., Armston, J., Wilkes, P., Soto-Berelov, M., Haywood, A., & Mellor, A. (2015). Understanding the variability in ground-based methods for retrieving canopy openness, gap fraction, and leaf area index in diverse forest systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 205, 83 – 95. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.012>
- Zabret, K., Rakovec, J., & Šraj, M. (2018). Influence of meteorological variables on rainfall partitioning for deciduous and coniferous tree species in urban area. *Journal of Hydrology*, 558, 29 – 41. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.025>

