

# Nutrient input via gross rainfall, throughfall and stemflow in scrubland species in northeastern Mexico

## Aporte de nutrientes vía precipitación incidente, directa y escurrimiento fustal en especies de matorral en el noreste de México

Erik O. Luna-Robles; Israel Cantú-Silva\*; Humberto González-Rodríguez; José G. Marmolejo-Monsiváis; María I. Yáñez-Díaz; Silvia J. Béjar-Pulido

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales.  
Carretera Nacional núm. 85, km 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

\*Corresponding author: [icantu59@gmail.com](mailto:icantu59@gmail.com), tel.: +52 (821) 212 4895.

### Abstract

**Introduction:** Precipitation is an important factor in the input of nutrients to ecosystems. In some cases, rainfall can add elements that are not available due to area conditions.

**Objective:** To compare the nutritional contribution in gross rainfall (Pi) and rainwater reaching the soil by throughfall (Pd) and stemflow (Ef) of scrubland species.

**Materials and methods:** A total of 41 rainfall events were evaluated in northeastern Mexico in the period September 2016-September 2017. Precipitation volumes were recorded and their chemical composition were analyzed: pH, electrical conductivity and contribution of macronutrients (Ca, Mg and K) and micronutrients (Fe, Mn, Zn and Cu).

**Results and discussion:** Pi accumulated 508.97 mm. Pd is the one that deposits more nutrients to the soil. The net contribution (Pd+Ef) indicated that Fe was the most deposited micronutrient with 2 938.29 g·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, of which *Casimiroa greggii* (S. Watson) F. Chiang contributed 31.59 %. The macronutrient with greater presence was Ca with 319.31 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, being *Acacia farnesiana* (L.) Willd. the one that achieved greater flow of the mineral (22.66 %). pH and electrical conductivity were similar (Kruskal-Wallis,  $P > 0.05$ ) in the three types of rainfall.

**Conclusion:** The precipitation chemistry is modified after passing the canopy of each species, either to enrich or remove nutrient concentrations, playing an important role in the biogeochemical cycles of the ecosystem.

**Keywords:** *Casimiroa greggii*; *Acacia farnesiana*; thornscrub; pH; electrical conductivity.

### Resumen

**Introducción:** La precipitación es un factor importante en el aporte de nutrientes a los ecosistemas. En algunos casos, mediante la lluvia pueden agregarse elementos que por las condiciones del área no están disponibles.

**Objetivo:** Comparar el aporte nutrimental en la precipitación incidente (Pi) y en el agua de lluvia que llega al suelo por precipitación directa (Pd) y escurrimiento fustal (Ef) de especies de matorral.

**Materiales y métodos:** Se evaluaron 41 eventos de lluvia en el noreste de México en el periodo septiembre 2016-septiembre 2017. Se registraron los volúmenes de precipitación y se analizó su composición química: pH, conductividad eléctrica y aporte de macro (Ca, Mg y K) y micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu).

**Resultados y discusión:** La Pi acumuló 508.97 mm. La Pd es la que deposita mayor cantidad de nutrientes al suelo. El aporte neto (Pd+Ef) indicó que el Fe fue el micronutriente más depositado con 2 938.29 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, de los cuales *Casimiroa greggii* (S. Watson) F. Chiang aportó 31.59 %. El macronutriente con mayor presencia fue el Ca con 319.31 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, siendo *Acacia farnesiana* (L.) Willd. la que logró mayor flujo del mineral (22.66 %). El pH y conductividad eléctrica fueron similares (Kruskal-Wallis,  $P > 0.05$ ) en los tres tipos de precipitación.

**Conclusión:** La química de la precipitación se modifica después de pasar el dosel de cada especie, ya sea para enriquecer o remover las concentraciones de nutrientes, jugando un papel importante en los ciclos biogeoquímicos del ecosistema.

**Palabras clave:** *Casimiroa greggii*; *Acacia farnesiana*; matorral espinoso; pH; conductividad eléctrica.

## Introduction

Wet deposition influences nutrient cycling and the distribution of pollutants in ecosystems. Many substances reaching the atmosphere react with each other and water; the products resulting from these interactions are washed away by rainfall as solutions or insoluble particles (Duarte, Gioda, Ziolli, & Duó, 2013), causing imbalances in soil composition and properties.

Precipitation in forest ecosystems is divided into throughfall, stemflow and interception loss; a classification that is important in forest hydrology studies (Lida, Tanaka, & Sugita, 2005; Yáñez, Cantú, González, & Uvalle, 2014). Throughfall refers to rainfall under the canopy; that is, the amount of water flowing through the canopy through clearings or by dripping of leaves and branches (Cantú & González, 2005). Intercepted rainfall is the part of the precipitation retained by the canopy that does not reach the forest floor and is returned to the atmosphere by the evaporation process, also called interception loss (Taghi, Attarod, & Bayramzadeh, 2013; Yáñez et al., 2014). Finally, stemflow corresponds to the fraction of rainfall that reaches the forest floor, sliding down the tree stem and branches, which is caused by precipitation intercepted by the canopy components (Staelens, De-Schrijver, Verheyen, & Verhoest, 2008). Net precipitation is the amount of rainfall that reaches the forest floor via throughfall and stemflow (André, Jonard, & Ponette, 2008; Levia & Herwitz, 2005).

The objective of this research was to compare the concentrations of micronutrients and macronutrients in the gross rainfall and in the rainwater reaching the soil by throughfall and stemflow of scrubland species; in addition, the variations of pH and electrical conductivity were analyzed. It should be noted that there is no previous studies of the chemical composition of precipitation within this ecosystem, which could generate important information that can be used in decisions and technical criteria to achieve sustainability of natural resources.

## Materials and methods

### Study area

The study was conducted at the Experimental Campus of the Faculty of Forest Sciences of the Universidad Autónoma de Nuevo León (24° 47' N; 99° 32' W), located in Linares, Nuevo León. The site has an area of 500 ha and elevation of 350 m. The average monthly temperature varies from 15 to 22 °C and the average annual rainfall is approximately 800 mm. The main type of vegetation is called Tamaulipan thornscrub also known as MET. The dominant soils are dark grey, lime-

## Introducción

La deposición húmeda influye en el ciclo de nutrientes y en la distribución de contaminantes en los ecosistemas. Muchas de las sustancias que llegan a la atmósfera reaccionan entre sí y con el agua; los productos resultantes de esas interacciones son arrastrados por las lluvias como soluciones o partículas insolubles (Duarte, Gioda, Ziolli, & Duó, 2013), provocando desequilibrios en la composición y propiedades del suelo.

La precipitación en los ecosistemas forestales se divide en precipitación directa, escurrimiento fustal y pérdida de interceptación; clasificación que es importante en los estudios de hidrología forestal (Lida, Tanaka, & Sugita, 2005; Yáñez, Cantú, González, & Uvalle, 2014). La precipitación directa se refiere a la lluvia debajo del dosel; es decir, la cantidad de agua que fluye por el dosel a través de claros o por goteo de las hojas y ramas (Cantú & González, 2005). La lluvia interceptada es la parte de la precipitación retenida por el dosel de copas que no alcanza el piso del bosque y es regresada a la atmósfera por el proceso de evaporación, también denominada pérdidas por interceptación (Taghi, Attarod, & Bayramzadeh, 2013; Yáñez et al., 2014). Finalmente, el escurrimiento fustal corresponde a la fracción de la lluvia que llega al piso del bosque, deslizándose por los fustes y ramas de los árboles, la cual es ocasionada por la precipitación interceptada por los componentes del dosel de copas (Staelens, De-Schrijver, Verheyen, & Verhoest, 2008). La precipitación neta es la cantidad de lluvia que llega al suelo del bosque a través de la precipitación directa y el escurrimiento fustal (André, Jonard, & Ponette, 2008; Levia & Herwitz, 2005).

La presente investigación tuvo como objetivo comparar las concentraciones de micro y macronutrientes en la precipitación incidente y en el agua de lluvia que llega al suelo por precipitación directa y escurrimiento fustal de especies de matorral; además, se analizaron las variaciones del pH y conductividad eléctrica. Cabe destacar que no existen antecedentes en lo que refiere al estudio de la composición química de la precipitación dentro de este ecosistema, lo que podría generar información importante que puede ser usada en las decisiones y criterios técnicos para lograr la sustentabilidad de los recursos naturales.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el Campus Experimental de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (24° 47' N; 99° 32' O), localizado en Linares, Nuevo León. El sitio cuenta con una superficie de 500 ha y una elevación de 350 m.

grey, lime-clay, deep vertisols with montmorillonite (González, Ramírez, Cantú, Gómez, & Uvalle, 2010).

#### Measurement of gross rainfall, throughfall and stemflow

Gross rainfall (Pi) was measured according to the methodology used by Cantú and González (2001), which is based on the establishment, at random, of four U-shaped PVC gutters in an open area without trees and adjacent to the experimental plots. Each gutter represented a collection area of 0.1 m<sup>2</sup> (10 cm wide x 100 cm long), which was placed 1 m high above the ground surface. The gutters were connected to 20 L containers by hoses and covered with a mesh to avoid obstruction and contamination of the precipitation samples.

The throughfall samples (Pd) were collected with the same type and number of gutters already described, but located under the canopy of *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (huizache), *Condalia hookeri* M. C. Johnst (palo Brasil), *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit (huaje), *Casimiroa greggii* (S. Watson) F. Chiang (yellow chapote), and a plot composed of a heterogeneous canopy characteristic of MET. Table 1 shows the average tree measurement characteristics of each species used.

The stemflow (Ef) component was measured on four trees in each of the canopies of *A. farnesiana*, *C. hookeri* and *C. greggii* only, because they met the diameter dimensions (>15 cm) needed to place the spiral collector. The collector is a perforated hose with a length of about 2 m, adjusted and sealed with silicone in the stem, to intercept the water that drains around the trunk and collect the sample in a 20 L container.

La temperatura media mensual varía de 15 a 22 °C y la precipitación media anual es aproximadamente de 800 mm. El principal tipo de vegetación es denominado matorral espinoso tamaulipeco también conocido como MET. Los suelos dominantes son vertisoles profundos, gris oscuros, limo-grisáceos, limo-arcillosos con montmorillonita (González, Ramírez, Cantú, Gómez, & Uvalle, 2010).

#### Medición de la precipitación incidente, precipitación directa y escurrimiento fustal

La precipitación incidente (Pi) se midió de acuerdo con la metodología empleada por Cantú y González (2001), la cual se basa en el establecimiento, al azar, de cuatro canaletas de PVC en forma de U en un área abierta sin árboles y contigua a las parcelas experimentales. Cada canaleta representó un área de colecta de 0.1 m<sup>2</sup> (10 cm de ancho x 100 cm de largo), la cual se colocó a 1 m de altura sobre la superficie del suelo. Las canaletas se conectaron a recipientes de 20 L por medio de mangueras y se cubrieron con una malla para evitar obstrucción y contaminación de las muestras de precipitación.

Las muestras de precipitación directa (Pd) se recolectaron con el mismo tipo y número de canaletas ya descritas, pero ubicadas debajo del dosel de plantaciones de *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (huizache), *Condalia hookeri* M. C. Johnst (palo Brasil), *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit (huaje), *Casimiroa greggii* (S. Watson) F. Chiang (chapote amarillo), y de una parcela compuesta por un dosel heterogéneo característico del MET. El Cuadro 1 muestra las características dasométricas promedio de cada especie empleada.

**Table 1. Tree measurement characteristics of the species under study in the Tamaulipan thornscrub.**

**Cuadro 1. Características dasométricas promedio de las especies bajo estudio en el matorral espinoso tamaulipeco.**

Type of coverage / Tipo de cobertura	DBH (cm) / DAP (cm)	Height (m) / Altura (m)	Crown area (m <sup>2</sup> ) / Área de copa (m <sup>2</sup> )
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.	28.3	5.3	42.2
<i>Condalia hookeri</i> M. C. Johnst	9.5	8.5	13.5
<i>Casimiroa greggii</i> (S. Watson) F. Chiang	17.0	7.1	22.6
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.	7.2	9.2	4.0
Tamaulipan thornscrub / Matorral espinoso tamaulipeco	7.0	7.5	4.5

## Chemical analysis

Rainwater samples were taken to the laboratory to determine pH and electrical conductivity ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), using an electrode with a potentiometer-conductivity meter (CORNING, model 542, USA). Then, the samples were filtered with Whatman paper number 1 and cooled to 4 °C to reduce microbial activity until further nutrient analysis.

## Nutrient analysis

The concentrations of micronutrients (Fe, Zn, Mn and Cu) and macronutrients (K, Ca and Mg), essential for plant development, were determined in Pi, Pd and Ef. The samples were analyzed using an atomic absorption spectrophotometer (Varian, model SpectrAA-200, USA). The nitrogen (N) content was not evaluated, due to the lack of operational capacity for determination. In the case of macronutrients it was necessary to make dilutions to determine the absorption of radiation at different wavelengths according to the element analyzed, using the following suppressors in order to avoid ionization during the analysis: Calcium (Ca), solutions 1:5 with potassium chloride (KCl); magnesium (Mg), solutions 1:5 with lanthanum chloride ( $\text{LaCl}_3$ ); and potassium (K), solutions 1:5 with cesium chloride (CsCl).

## Nutrient input

The contribution of macro and micronutrients per event was determined in the Pi, Pd and Ef of the coverages. The nutrient flows were estimated by multiplying the mean nutrient content ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) obtained by the spectrophotometer by the corresponding volume (L) of rainwater collected in Pi and Pd, between the area occupied by the gutter (0.10 m<sup>2</sup>). For Ef, the area of the crown of each tree was considered as the precipitation collector surface, carrying out with it the necessary transformations to convert to  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  units. The average of the four replications corresponding to each sample of Pi, Pd and Ef collected was estimated per event; in order to determine the annual contribution, all the recorded averages were added together.

The net nutrient input was estimated by adding the concentrations of Pd and Ef (if recorded), according to the same principle as used by Béjar et al. (2018). The net contribution was recorded for the species *A. farnesiana*, *C. greggi* and *C. hookeri*; in the case of *L. leucocephala* and MET this sum was not considered due to the lack of stemflow, so the net value was the one found in Pd. It should be noted that the addition of Ef did not cause a significant change in the contents of the evaluated nutrients.

El componente de escurrimiento fustal (Ef) se midió en cuatro árboles de cada uno de los doseles de *A. farnesiana*, *C. hookeri* y *C. greggi* únicamente, debido a que cumplieron con las dimensiones diamétricas (>15 cm) necesarias para colocar el colector en espiral. El colector es una manguera perforada con una longitud de 2 m aproximadamente, ajustada y sellada con silicón en el fuste, para interceptar el agua que escurre alrededor del tronco y recolectar la muestra en un recipiente de 20 L.

## Análisis químico

Las muestras de agua de lluvia se llevaron al laboratorio, para determinar el pH y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), usando un electrodo con un potenciómetro-conductivímetro (CORNING, modelo 542, EUA). Después, las muestras se filtraron con papel Whatman número 1 y se refrigeraron a 4 °C con el fin de reducir la actividad microbiana hasta su análisis posterior de nutrientes.

## Análisis de nutrientes

Las concentraciones de micronutrientes (Fe, Zn, Mn y Cu) y macronutrientes (K, Ca y Mg), esenciales para el desarrollo de las plantas, se determinaron en Pi, Pd y Ef. Las muestras se analizaron con el uso de un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian, modelo SpectrAA-200, EUA). El contenido de nitrógeno (N) no se evaluó, debido a la falta de capacidad operativa para su determinación. En el caso de los macronutrientes fue necesario hacer diluciones para determinar la absorción de radiación a diferentes longitudes de onda según el elemento analizado, utilizando los siguientes supresores con el fin de evitar la ionización durante el análisis: Calcio (Ca), soluciones 1:5 con cloruro de potasio (KCl); magnesio (Mg), soluciones 1:5 con cloruro de lantano ( $\text{LaCl}_3$ ); y potasio (K), soluciones 1:5 con cloruro de cesio (CsCl).

## Aporte de nutrientes

El aporte de macro y micronutrientes por evento se determinó en la Pi, Pd y Ef de las coberturas. Los flujos de nutrientes se calcularon multiplicando el contenido medio de nutrientes ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) obtenido por el espectrofotómetro, por el volumen (L) correspondiente de agua de lluvia recolectada en Pi y Pd, entre el área ocupada por la canaleta (0.10 m<sup>2</sup>). Para el Ef, el área de la copa de cada árbol se consideró como la superficie receptora de la precipitación, realizando con ello las transformaciones necesarias para convertir a unidades de  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ . El promedio de las cuatro repeticiones correspondientes a cada muestra de Pi, Pd y Ef recolectada se calculó por evento; para determinar el aporte anual, se sumó la totalidad de los promedios registrados.

## Statistical analysis

The data were analyzed through the statistical package SPSS version 22 (International Business Machines [IBM], 2013). The Kolmogorov-Smirnov test of normality and goodness of fit was applied, which rejected the hypothesis of normality of the data. Therefore, non-parametric tests (Kruskal-Wallis) were applied to establish significant statistical differences ( $P \leq 0.05$ ) in Pd and Ef nutrient input per event and per annual cumulative between canopy types. Non-parametric comparison tests (Kruskal-Wallis) were also applied to determine significant differences ( $P < 0.05$ ) in pH and electrical conductivity (EC) values of Pi, Pd and Ef of the coverages recorded per event.

## Results and discussion

### Gross rainfall

In the period September 2016-September 2017, 41 rainfall events were recorded (Figure 1), in which 508.97 mm were accumulated. The months of November and May had the highest number of events, each with five records. Seasonally, the highest precipitation was recorded in spring with 228.6 mm; in summer, autumn and winter, precipitation was 152.39, 104.89 and 23.03 mm, respectively.

### Nutrient input via gross rainfall

Nutrient concentrations in Pi reflect that Ca ( $76.25 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ ) is the macronutrient that enters the soil more often, following in descending order K ( $20.40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ ) and Mg ( $9.39 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ ). As for micronutrients, the highest contributions were Fe with  $521.55 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ , followed by Mn, Zn and Cu

El aporte neto de nutrientes se calculó mediante la suma de las concentraciones de Pd y Ef (en caso de registrarse), de acuerdo con el mismo principio que utilizó Béjar et al. (2018). El aporte neto se registró para las especies *A. farnesiana*, *C. greggi* y *C. hookeri*; para el caso de *L. leucocephala* y MET no se consideró esta suma por falta del componente escurrimiento fustal, por lo que el valor neto fue el encontrado en sus Pd. Cabe señalar que la adición de Ef no causó un cambio significativo en los contenidos de los nutrientes evaluados.

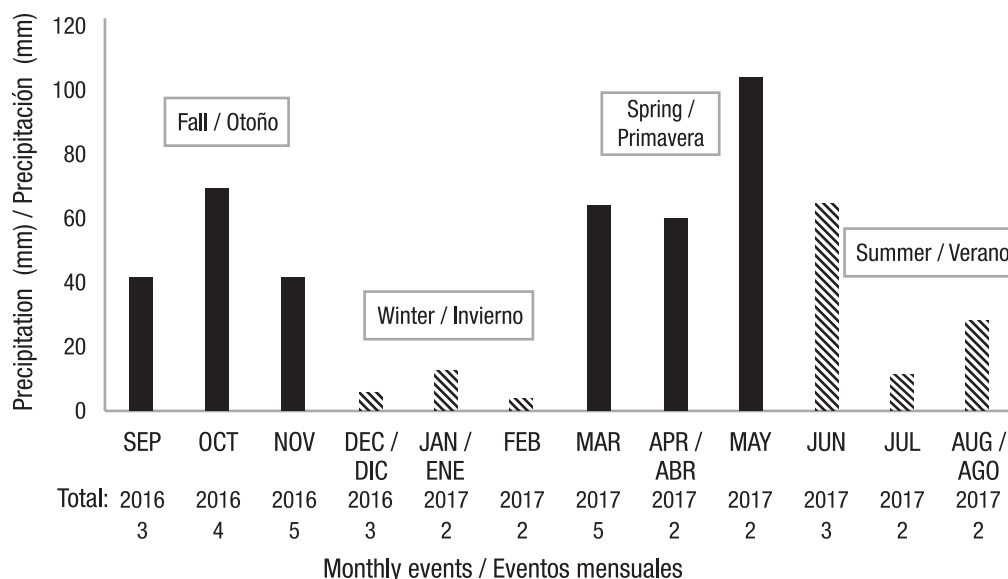
### Análisis estadístico

Los datos se analizaron a través del paquete estadístico SPSS versión 22 (International Business Machines [IBM], 2013). Se aplicó la prueba de normalidad y bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, la cual rechazó la hipótesis de normalidad de los datos, por lo que se procedió a aplicar pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis), para establecer las diferencias estadísticas significativas ( $P \leq 0.05$ ) en el aporte de nutrientes de Pd y Ef por evento y por acumulado anual entre los tipos de dosel vegetal. Asimismo, se aplicaron pruebas de comparación no paramétricas (Kruskal-Wallis), para determinar diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en los valores de pH y conductividad eléctrica (CE) en la Pi, Pd y Ef de las coberturas por eventos registrados.

## Resultados y discusión

### Precipitación incidente

En el periodo septiembre 2016-septiembre 2017 se registraron 41 eventos de lluvia (Figura 1), en los cuales se acumularon 508.97 mm. Los meses de noviembre y mayo presentaron mayor cantidad de eventos, cada uno con cinco registros. Estacionalmente, la mayor



**Figure 1. Monthly gross rainfall and number of events in areas with thorny scrub vegetation.**

**Figura 1. Precipitación incidente mensual y número de eventos en áreas con vegetación de matorral espinoso.**

**Table 2. Nutrient input via gross rainfall.**  
**Cuadro 2. Aporte de nutrientes vía precipitación incidente.**

Micronutrient/ Micronutriente	Input (g·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup> )/ Aporte (g·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )	Macronutrient/ Macronutriente	Input (kg·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup> )/ Aporte (kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )
Fe	521.55	Ca	76.25
Mn	180.21	K	20.40
Zn	130.16	Mg	9.39
Cu	29.10		
Total	861.02		106.04

with 180.21, 130.16 and 29.10 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, respectively (Table 2). The trends shown by the macronutrient flows (Ca>K>Mg) via Pi coincide with those obtained by Béjar et al. (2018) and Zhang, Wang, Pan, and Hu (2016).

High Ca contents may be related to ecosystem conditions, since soils are developed on rocks of calcareous origin and, therefore, Ca is in greater mobilization on the environment, unlike the micronutrients Mn, Zn and Cu. On the other hand, Segovia et al. (2009) refer to the fact that Fe is the fourth most abundant element on the earth's crust, which follows the atmospheric route as one of the main access routes, agreeing with the results found in this research.

#### Nutrient input via throughfall

The results showed differences in nutrient input per event in at least one of the tree coverages, from the value of the bilateral asymptotic ( $P \leq 0.05$ ). According to Table 3, the contribution of the macronutrients Ca, K and Mn was different among the species in 17, 20 and nine rainfall events, respectively. With respect to micronutrients, Cu showed significant differences in six of the 41 events analyzed, while Fe, Mn and Zn in 18, 16 and 16 events, respectively. Likely these temporal variations are related to the addition of soil particles and atmospheric dusts, and to the biomass composition of the species at different dates. In events 26, 27, 28 and 37 in Cu and 24 and 34 in Mg the level of significance of the statistical test is not shown, due to the fact that only one of the evaluated species had accumulation of these nutrients, limiting the interspecific comparison. According to the statistics of the Kruskal-Wallis test, there are no differences ( $P > 0.05$ ) between the annual input of micro and macronutrients among the five tree canopies analyzed.

precipitación se registró en primavera con 228.6 mm; en verano, otoño e invierno, la precipitación fue 152.39, 104.89 y 23.03 mm, respectivamente.

#### Aporte de nutrientes vía precipitación incidente

Las concentraciones de nutrientes en la Pi reflejan que el Ca (76.25 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>) es el macronutriente que ingresa en mayor cantidad al suelo, siguiendo en orden descendente el K (20.40 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>) y el Mg (9.39 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>). En cuanto a los micronutrientes, las contribuciones más altas fueron de Fe con 521.55 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, seguido de Mn, Zn y Cu con 180.21, 130.16 y 29.10 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente (Cuadro 2). Las tendencias mostradas por los flujos de macronutrientes (Ca>K>Mg) vía Pi coinciden con los obtenidos por Béjar et al. (2018) y Zhang, Wang, Pan, y Hu (2016).

Los contenidos altos de Ca pueden estar relacionados con las condiciones del ecosistema, ya que los suelos están desarrollados sobre rocas de origen calcáreo y, por ende, el Ca se halla en mayor movilización sobre el ambiente, a diferencia de los micronutrientes Mn, Zn y Cu. Por otra parte, Segovia et al. (2009) hacen referencia a que el Fe es el cuarto elemento más abundante sobre la corteza terrestre, el cual sigue la vía atmosférica como una de sus principales rutas de acceso, concordando con los resultados encontrados en la presente investigación.

#### Aporte de nutrientes vía precipitación directa

Los resultados mostraron diferencias en el aporte de nutrientes por evento en al menos una de las coberturas arbóreas, a partir del valor de la asintótica bilateral ( $P \leq 0.05$ ). De acuerdo con el Cuadro 3, el aporte de los macronutrientes Ca, K y Mn fue diferente

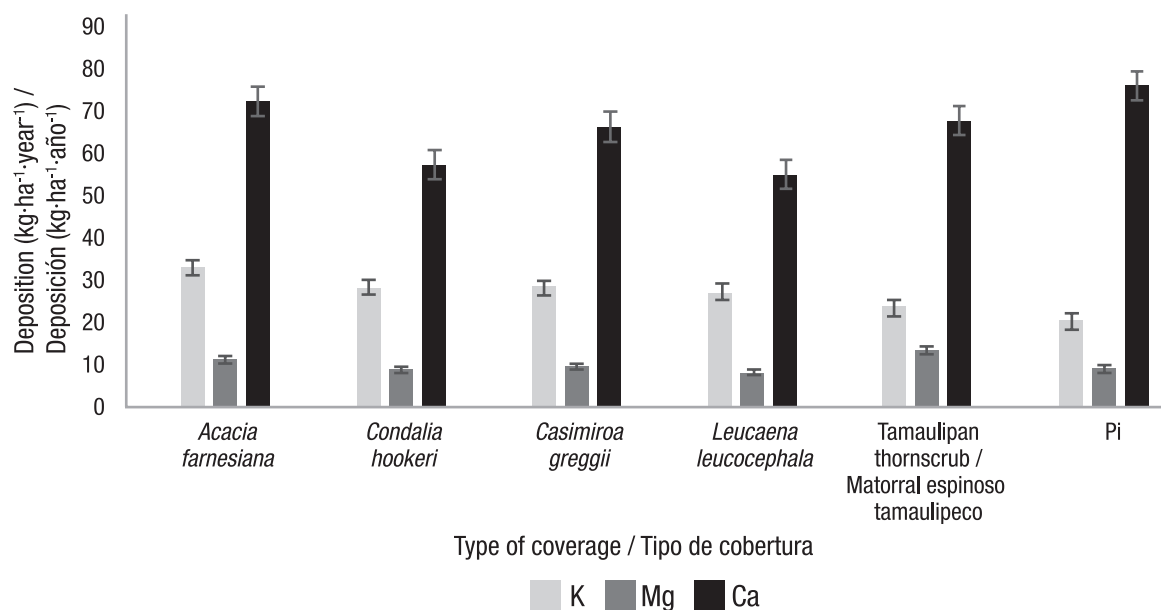
**Table 3. Statistical significance (*P*-values) of the comparison of nutrient input in the throughfall of five tree canopies (*Acacia farnesiana*, *Condalia hookeri*, *Leucaena leucocephala*, *Casimiroa greggii* and thorny scrubland) analyzed per event.**

**Cuadro 3. Significancias estadísticas (valores *P*) de la comparación del aporte de nutrientes en la precipitación directa de cinco doseles arbóreos (*Acacia farnesiana*, *Condalia hookeri*, *Leucaena leucocephala*, *Casimiroa greggii* y matorral espinoso) analizados por evento.**

Event/ Evento	Fe	Mn	Zn	Cu	Ca	K	Mg	Precipitation (mm)/ Precipitación (mm)	Date/Fecha
	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>		
1	0.01*	0.52	0.05	0.08	0.04*	0.19	0.04*	3.83	23/09/2016
2	0.06	0.02*	0.05*	0.40	0.58	0.05	0.61	15.43	26/09/2016
3	0.04*	0.02*	0.05	0.03*	0.01*	0.11	0.09	22.04	27/09/2016
4	0.01*	0.01*	0.76	0.01*	0.32	0.01*	0.07	6.60	01/10/2016
5	0.02*	0.07	0.33	0.26	0.01*	0.37	0.77	2.97	02/10/2016
6	0.62	0.31	0.17	0.85	0.23	0.69	0.53	47.32	13/10/2016
7	0.44	0.03*	0.04*	0.04*	0.07	0.03*	0.27	12.76	22/10/2016
8	0.04*	0.31	0.49	0.05*	0.02*	0.76	0.02*	0.69	04/11/2016
9	0.05*	0.01*	0.39	0.07	0.01*	0.01*	0.12	15.54	05/11/2016
10	0.22	0.22	0.17	0.55	0.14	0.13	0.52	0.59	07/11/2016
11	0.03*	0.01*	0.02*	0.26	0.03*	0.55	0.12	8.47	09/11/2016
12	0.03*	0.02*	0.53	0.73	0.09	0.18	0.02*	16.17	14/11/2016
13	0.76	0.07	0.39	0.24	0.69	0.01*	0.85	2.33	05/12/2016
14	0.32	0.27	0.69	0.54	0.24	0.01*	0.64	3.22	09/12/2016
15	0.76	0.03*	0.01*	0.66	0.67	0.31	0.15	0.78	28/12/2017
16	0.01*	0.01*	0.01*	0.01*	0.01*	0.01*	0.01*	0.72	06/01/2017
17	0.13	0.02*	0.41	0.15	0.54	0.07	0.10	0.68	07/01/2017
18	0.17	0.01*	0.01*	0.01*	0.01*	0.01*	0.01*	11.28	28/01/2017
19	0.48	0.36	0.12	0.73	0.02*	0.01*	0.95	3.03	04/02/2017
20	0.13	0.04*	0.02*	0.22	0.18	0.01*	0.39	0.99	25/02/2017
21	0.11	0.07	0.02*	0.17	0.03*	0.05*	0.53	7.13	05/03/2017
22	0.02*	0.31	0.01*	0.54	0.07	0.23	0.52	7.75	08/03/2017
23	0.47	0.08	0.70	0.41	0.13	0.04*	0.24	11.00	10/03/2017
24	0.75	0.19	0.01*	0.19	0.15	0.01*	-	19.88	11/03/2017
25	0.61	0.05	0.01*	0.66	0.02*	0.03*	0.25	19.00	18/03/2017
26	0.02*	0.53	0.48	-	0.17	0.01*	0.93	56.50	12/04/2017
27	0.43	0.08	0.29	-	0.67	0.01*	0.02*	3.50	23/04/2017
28	0.03*	0.20	0.06	-	0.15	0.01*	0.05*	3.00	04/05/2017
29	0.11	0.06	0.35	0.37	0.03*	0.01*	0.02*	0.88	07/05/2017
30	0.06	0.11	0.20	0.44	0.01*	0.01*	0.11	1.93	11/05/2017
31	0.01*	0.01*	0.40	0.42	0.05*	0.37	0.11	11.50	12/05/2017
32	0.01*	0.01*	0.53	0.47	0.05	0.06	0.34	0.99	23/05/2017
33	0.01*	0.01*	0.07	0.81	0.38	0.11	0.72	5.13	24/05/2017
34	0.01*	0.01*	0.05*	0.09	0.07	0.22	-	80.50	30/05/2017
35	0.01*	0.11	0.01*	0.19	0.60	0.07	0.03*	0.62	20/06/2017
36	0.01*	0.11	0.01*	0.09	0.01*	0.08	0.10	10.90	26/06/2017
37	0.05	0.06	0.33	-	0.18	0.39	0.08	53.38	28/06/2017
38	0.88	0.57	0.47	0.17	0.10	0.05	0.36	10.28	07/07/2017
39	0.15	0.70	0.84	0.47	0.03*	0.01*	0.06	1.50	09/07/2017
40	0.12	0.21	0.01*	0.55	0.04*	0.01*	0.15	23.13	04/08/2017
41	0.27	0.69	0.05*	0.54	0.06	0.25	0.30	5.10	05/08/2017

\*Values with significant differences (Kruskal-Wallis  $P \leq 0.05$ ) in nutrient input among species.

\*Valores con diferencias significativas (Kruskal-Wallis  $P \leq 0.05$ ) en el aporte de nutrientes entre especies.



**Figure 2. Contribution of macronutrients via throughfall for each plant canopy and via gross rainfall (Pi).**

**Figura 2. Aporte de macronutrientes vía precipitación directa para cada dosel vegetal y vía precipitación incidente (Pi).**

Figure 2 shows that *A. farnesiana* was the species with the highest contributions of Ca and K (72.33 and 33.10 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, respectively) in Pd, while the highest content of Mg was found in the plot corresponding to MET with 13.55 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>. In general, a part of the Ca contribution via rainfall is retained by all the tree canopies, while Mg is slightly retained only in *C. hookeri* and *L. leucocephala* with contributions of 9.03 and 8.31 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> with respect to those thrown by Pi (9.62 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>). This coincides with Béjar (2018), Jiménez, Calvo, and Arias (2006), and Jaramillo (2003), who describe a removal of these nutrients as precipitation passes through the canopies.

The concentration of K was significantly enriched by the five canopies evaluated. The average enrichments showed 1.38 times more than that recorded in Pi; therefore, K is a mobile nutrient in plants and leaches more easily. This enrichment may be an effect of chemical interactions between rain, dry deposition, exudations and canopy leaching (Návar, González, & González, 2009). Other studies have shown this same behavior; for example, Jaramillo (2003) found that K increased, when passing through the aerial part, up to 9.6 times more than the estimated amount of rainwater, variation mainly caused by foliar washing; Shen, Ren, Jenerette, Hui, and Ren (2013) found increases of about 20 times in Pd in plantations of *Dimocarpus longan* Lour and *Acacia mangium* Wild.

According to Table 4, Pd followed the same trend in micronutrient intake for all coverages analyzed: Fe>Zn>Mn>Cu. *Casimiroa greggii* canopy had the highest amount of Fe with 889.53 g·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, MET

entre las especies en 17, 20 y nueve eventos de lluvia, respectivamente. Con respecto a los micronutrientes, el Cu presentó diferencias significativas en seis de los 41 eventos analizados, mientras que Fe, Mn y Zn en 18, 16 y 16 eventos, respectivamente. Posiblemente estas variaciones temporales estén relacionadas con la adición de partículas de suelo y polvos atmosféricos, y con la composición de la biomasa de las especies en fechas diferentes. En los eventos 26, 27, 28 y 37 en Cu y 24 y 34 en Mg no se muestra el nivel de significación de la prueba estadística, debido a que solo una de las especies evaluadas presentó acumulación de dichos nutrientes, limitando la comparación interespecífica. De acuerdo con los estadísticos de la prueba de Kruskal-Wallis, no existen diferencias ( $P > 0.05$ ) entre los aportes anuales de micro y macronutrientes entre los cinco doseles arbóreos analizados.

La Figura 2 muestra que *A. farnesiana* fue la especie con mayores aportes de Ca y K (72.33 y 33.10 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente) en la Pd, mientras que el contenido más alto de Mg se encontró en la parcela correspondiente a MET con 13.55 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>. En general, una parte del aporte de Ca vía lluvia es retenido por todos los doseles arbóreos, mientras que el Mg es ligeramente retenido solo en *C. hookeri* y *L. leucocephala* con aportes de 9.03 y 8.31 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> respecto a los arrojados por Pi (9.62 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>). Esto coincide con Béjar (2018), Jiménez, Calvo, y Arias (2006), y Jaramillo (2003), quienes describen una remoción de estos nutrientes con el paso de la precipitación por los doseles.

La concentración de K fue enriquecida significativamente por los cinco doseles evaluados. Los



**Table 4. Annual contribution of micronutrients via throughfall per canopy type.****Cuadro 4. Aporte anual de micronutrientes vía precipitación directa por tipo de dosel vegetal.**

Type of coverage / Tipo de cobertura	Input (g·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup> ) / Aporte (g·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )			
	Fe	Mn	Zn	Cu
<i>Acacia farnesiana</i>	655.96	102.46	150.8	65.03
<i>Condalia hookeri</i>	613.43	55.5	130.7	58.31
<i>Casimiroa greggii</i>	889.53	73.13	160.97	45.1
<i>Leucaena leucocephala</i>	394.18	101.86	115.43	26.59
Tamaulipan thornscrub / Matorral espinoso tamaulipeco	342.11	118.93	203.38	31.64
Total	2 895.21	451.88	761.28	226.67

had the highest values of Zn and Mn with 203.38 and 118. g·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, respectively and, finally, *A. farnesiana* had the highest amount of Cu with 65.03 g·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>.

#### Nutrient input via stemflow

The contribution of calcium in Ef of the three species studied showed significant differences in nine of the 24 rainfall events analyzed, while K and Mg showed differences in six events. Cu, Fe, Mn and Zn showed differences in four, six, five and 10 rainfall events, respectively. In the case of Cu, the events 14, 23, 24, 26 and 27 were not compared due to the null contribution of two of the species evaluated, repeating this situation in event 34 in Mg (Table 5).

The nutrients found were lower than those deposited via Pi and Pd. According to Table 6, the macronutrient and micronutrient with the highest mean annual intake were Mg and Fe with 0.52 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> and 43.08 kg·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup>, respectively. According to the results, *C. greggii* had the highest values of Mg, Ca, Fe, Zn, Cu and Mn, and *C. hookeri* provided K in greater quantity.

Studies estimating nutrient fluxes do not routinely consider Ef analysis because it is volumetrically lower compared to Pd per event (Germer, Zimmermann, Neill, Krusche, & Elsenbeer, 2012; Zhang et al., 2016); however, in the present study, the accumulated annual contribution of nutrients via Ef is considerable, representing 0.80 and 6.4 % of macro and micronutrients, respectively, in relation to that provided by Pi. One explanation for the low concentrations of nutrients in Ef is that, during the circulation of water through the stems, there was considerable absorption by epiphytic bryophytes (mosses and lichens). These grow abundantly

enriquecimientos promedios mostraron 1.38 veces más que el registrado en Pi; por lo tanto, K es un nutriente móvil en las plantas y se lixivia más fácilmente. Este enriquecimiento puede ser efecto de las interacciones químicas entre la lluvia, la deposición seca, las exudaciones y la lixiviación del dosel (Návar, González, & González, 2009). Otros estudios han manifestado este mismo comportamiento; por ejemplo, Jaramillo (2003) encontró que el K incrementó al pasar por la parte aérea hasta 9.6 veces más que la estimada en el agua de lluvia, variación provocada principalmente por el lavado foliar; Shen, Ren, Jenerette, Hui, y Ren (2013) encontraron incrementos de aproximadamente 20 veces en Pd en plantaciones de *Dimocarpus longan* Lour y *Acacia mangium* Wild.

De acuerdo con el Cuadro 4, la vía Pd siguió una misma tendencia en el aporte de micronutrientes para todas las coberturas analizadas: Fe>Zn>Mn>Cu. En el dosel de *C. greggii* se depositó la mayor cantidad de Fe con 889.53 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, en el MET se cuantificaron los valores más altos de Zn y Mn con 203.38 y 118.93 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente y, por último, en *A. farnesiana* se encontró la mayor cantidad de Cu con 65.03 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.

#### Aporte de nutrientes vía escurrimiento fustal

El aporte de calcio en la vía Ef de las tres especies analizadas mostró diferencias significativas en nueve de los 24 eventos de lluvia analizados, mientras que K y Mg presentaron diferencias en seis eventos. En cuanto a Cu, Fe, Mn y Zn se encontraron diferencias en cuatro, seis, cinco y 10 eventos de lluvia, respectivamente. En el caso del Cu, los eventos 14, 23, 24, 26 y 27 no se compararon debido a la contribución nula de dos de las especies evaluadas para esta vía, repitiéndose esta situación en el evento 34 en Mg (Cuadro 5).

**Table 5. Statistical significance (*P* values) of the comparison of nutrient contribution in the stemflow of three coverages (*Acacia farnesiana*, *Condalia hookeri*, *Casimiroa greggii*) analyzed per event.**

**Cuadro 5. Significancias estadísticas (valores *P*) de la comparación del aporte de nutrientes en el escurrimiento fustal de tres coberturas (*Acacia farnesiana*, *Condalia hookeri*, *Casimiroa greggii*) analizadas por evento.**

Event/ Evento	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca	K	Mg
	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
13	0.18	0.08	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08
14	-	1.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
15	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.32	0.22
16	0.49	0.08	0.20	0.34	0.30	0.57	0.25
17	0.08	0.04*	0.08	0.30	0.20	0.05*	0.61
18	0.08	0.03*	0.02*	0.02*	0.02*	0.02*	0.04*
19	0.23	0.06	0.03*	0.03*	0.04*	0.23	0.04*
21	0.02*	0.02*	0.08	0.02*	0.02*	0.04*	0.03*
22	0.22	0.03*	0.03*	0.03*	0.03*	0.03*	0.03*
23	-	0.62	0.06	0.03*	0.74	0.07	0.72
24	-	0.15	0.04*	0.04*	0.02*	0.03*	0.12
25	0.32	0.20	0.02*	0.04*	0.11	0.12	0.26
26	-	0.38	0.41	0.11	0.63	0.38	0.74
27	-	0.86	0.34	0.08	0.86	0.34	0.50
28	0.22	0.08	0.23	0.09	0.09	0.08	0.20
30	0.21	0.11	0.18	0.34	0.04*	0.15	0.41
31	0.11	0.02*	0.02*	0.10	0.03*	0.12	0.18
33	0.04*	0.03*	0.59	0.55	0.41	0.30	0.04*
34	0.02*	0.32	0.16	0.05*	0.30	0.15	-
36	0.37	0.07	0.20	0.19	0.07	0.08	0.38
37	0.30	0.57	0.90	0.75	0.44	0.93	0.17
38	0.70	0.44	0.68	0.42	0.53	0.45	0.82
40	0.03*	0.14	0.28	0.02*	0.03*	0.02*	0.03*
41	0.16	0.46	0.18	0.03*	0.05*	0.23	0.08

\*Values with significant differences (Kruskal-Wallis  $P \leq 0.05$ ) in nutrient input among species.

\*Valores con diferencias significativas (Kruskal-Wallis  $P \leq 0.05$ ) en el aporte de nutrientes entre especies.

**Table 6. Contribution of macronutrients and micronutrients via stemflow per type of canopy.**  
**Cuadro 6. Aporte de macronutrientes y micronutrientes vía escurrimiento fustal por tipo de dosel vegetal.**

Canopy/ Dosel vegetal	Macronutrients (kg·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup> )/ Macronutrientes (kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )			Micronutrients (g·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup> )/ Micronutrientes (g·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )			
	Ca	K	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
<i>Acacia farnesiana</i>	0.02	0.01	0.07	5.66	0.52	0.47	0.18
<i>Condalia hookeri</i>	0.07	0.06	0.19	10.29	0.72	1.38	0.49
<i>Casimiroa greggii</i>	0.09	0.04	0.26	27.13	2.27	3.34	3.10
Total	0.18	0.11	0.52	43.08	3.51	5.19	3.77

in the stems and trunks of trees, and contribute to the uptake and release of nutrients (Dawoe, Barnes, & Opong, 2018; Liu, Fox, & Xu, 2003).

#### Net input of nutrients

The net values for macronutrients showed the order Ca>K>Mg, where the tree structure of *A. farnesiana* provided the maximum Ca and K contents, while the MET canopy type added more Mg. Total micronutrient contributions showed the following trend: Fe>Zn>Mn>Cu, where the highest values of Zn and Mn were deposited in the MET plot, Fe in *C. hookeri*, and Cu in *A. farnesiana* (Table 7).

During the evaluation period, between the concentrations of Pi and the five coverages (Pd and Ef) analyzed, a total average of 675.16, 260.96, 857.32 and 3458.15 g·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> of Mn, Cu, Zn and Fe, respectively, and 217.88, 72.45 and 328.70 g·ha<sup>-1</sup>·year<sup>-1</sup> of K, Mg and Ca, respectively, was incorporated into the soil.

The results obtained in the present research showed variations in nutrient input between canopies, validating that many of the aspects in the nutrient cycle are directly affected by the morphology of the species and phenology (Cantú & González, 2001; Germer, Elsenbeer, & Moraes, 2006; Jaramillo, 2003; Lilienfein & Wilcke, 2004; Návar et al., 2009).

#### pH

The Kruskal-Wallis test showed no statistically significant differences ( $P > 0.05$ ) in pH between Pd and Ef circulating through the analyzed coverages and the gross rainfall in the analyzed events.

During the evaluation period, variations were observed between the pH of Pi and the Pd of the studied

Los nutrientes encontrados en esta vía fueron menores que los depositados vía Pi y Pd. De acuerdo con el Cuadro 6, el macronutriente y micronutriente con mayor aporte medio anual fueron el Mg y Fe con 0.52 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> y 43.08 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente. De acuerdo con los resultados, *C. greggii* presentó los valores más altos de Mg, Ca Fe, Zn, Cu y Mn, y *C. hookeri* aportó K en mayor cantidad.

Los estudios que estiman los flujos de nutrientes no consideran rutinariamente el análisis del Ef porque es volumétricamente menor en comparación con la Pd por evento (Germer, Zimmermann, Neill, Krusche, & Elsenbeer, 2012; Zhang et al., 2016); sin embargo, en el presente estudio, la contribución anual acumulada de nutrientes vía Ef es considerable, representando 0.80 y 6.4 % de macro y micronutrientes, respectivamente, en relación con el aportado por la Pi. Una explicación para las bajas concentraciones de nutrientes en el Ef es que, durante la circulación del agua a través de los fustes, sucedió una absorción considerable por briofitas epífitas (musgos y líquenes). Estas crecen abundantemente en los tallos y en los troncos de los árboles, y contribuyen a la captación y liberación de nutrientes (Dawoe, Barnes, & Opong, 2018; Liu, Fox, & Xu, 2003).

#### Aporte neto de nutrientes

Los valores netos para macronutrientes presentaron el orden Ca>K>Mg, donde la estructura arbórea de *A. farnesiana* aportó los contenidos máximos de Ca y K, mientras que el tipo de dosel del MET agregó mayor cantidad de Mg. Las contribuciones totales de micronutrientes mostraron la siguiente tendencia: Fe>Zn>Mn>Cu, donde los valores más altos de Zn y Mn se depositaron en la parcela correspondiente a MET, Fe en *C. hookeri*, y Cu en *A. farnesiana* (Cuadro 7).

**Table 7. Net contribution of macro and micronutrients per type of canopy.**  
**Cuadro 7. Aporte neto de macro y micronutrientes por tipo de dosel vegetal.**

Type of coverage/ Tipo de cobertura	Macronutrients (kg·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup> )/ Macronutrientes (kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )			Micronutrients (g·ha <sup>-1</sup> ·year <sup>-1</sup> )/ Micronutrientes (g·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )			
	Ca	K	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
<i>Acacia farnesiana</i>	72.35	33.16	11.42	661.62	102.98	151.27	65.21
<i>Condalia hookeri</i>	57.47	28.57	9.09	623.72	56.22	132.08	58.8
<i>Casimiroa greggii</i>	66.44	28.68	9.67	916.66	75.40	164.31	48.2
<i>Leucaena leucocephala</i>	55.21	27.45	8.31	394.18	101.86	115.43	26.59
Tamaulipan thornscrub/ Matorral espinoso tamaulipeco	67.85	23.78	13.55	342.11	118.93	203.38	31.64
Total	319.31	141.63	52.05	2 938.29	455.38	766.47	230.44

species. According to the results, it is reasonable to suppose that rain, when flowing through the tree cover, recharges mineral salts deposited in the foliage, which causes pH variations in Pd with respect to Pi. The most significant change occurred in the Pd of the canopy of *A. farnesiana*, with an overall average of 7.19, with respect to the Pi with an average value of 6.88, while the Pd of MET and *L. leucocephala* showed fewer alterations.

Figure 3 shows that in event 13, the Pi had a pH of 5.65 (slightly acidic), which was lower than those determined in the Pd, where rainwater, flowing through the canopy of each species, suffered a significant change reducing acidity as a result of the dragging of cations such as K and Mn. On the other hand, in the events 32 and 35 the opposite occurred, specifically in the plot of MET it was observed that the Pd, at the moment of flowing through the canopy of the trees, had acidification with a difference of 1.4 in relation to the pH of Pi; it should be noted that both events showed precipitations less than 5 mm.

The downward trend in pH as it passes through the canopy has also been documented in other ecosystems and has been attributed mainly to the presence of organic acids and other volatile particles in tree structures, as well as to the volume of Pd and Ef, which may have occurred in the MET plot in the events 32 and 35. For example, Jiménez et al. (2006) showed that the pH of Pi had a value of 5.58 with a slight increase as it passed through the treetops, reaching values of 5.83 in *Vochysia ferruginea* Mart, 5.98 in *Vochysia guatemalensis* Standl. and 5.96 in a secondary forest.

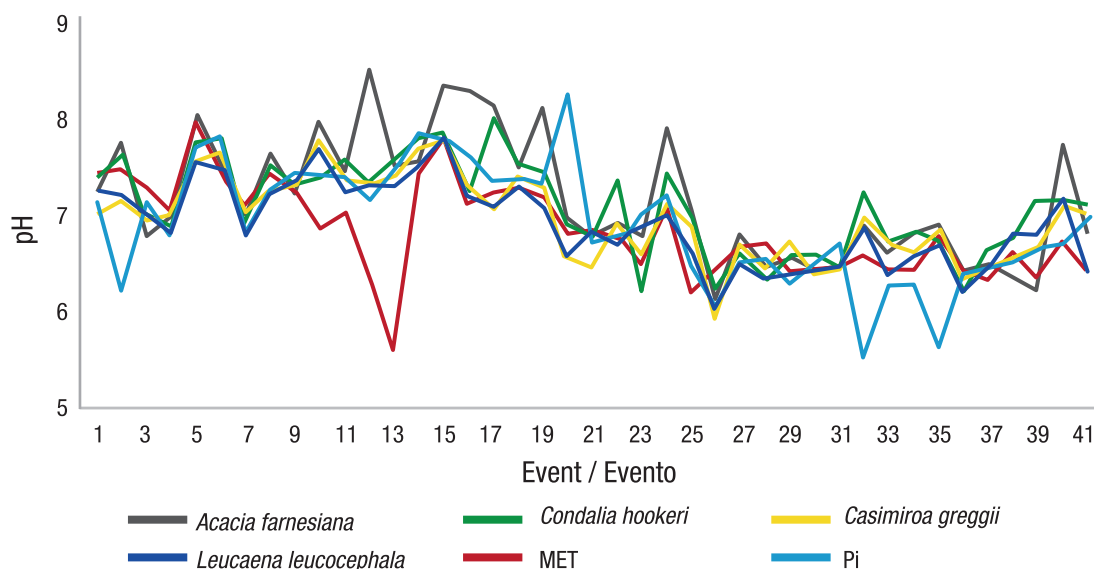
Durante el periodo de evaluación, entre las concentraciones de Pi y las cinco coberturas analizadas (Pd y Ef), se logró incorporar al suelo un promedio total de 675.16, 260.96, 857.32 y 3458.15 g·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> de Mn, Cu, Zn y Fe, respectivamente, y 217.88, 72.45 y 328.70 kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> de K, Mg y Ca, respectivamente.

Los resultados obtenidos en la presente investigación presentan variaciones en los aportes de nutrientes entre los doseles, confirmando que muchos de los aspectos en el ciclo de los nutrientes son afectados directamente por la morfología de las especies y por la fenología (Cantú & González, 2001; Germer, Elsenbeer, & Moraes, 2006; Jaramillo, 2003; Lilienfein & Wilcke, 2004; Návar et al., 2009).

#### pH

La prueba de Kruskal-Wallis no evidenció diferencias estadísticas significativas ( $P > 0.05$ ) del pH entre las vías (Pd y Ef) que circulan a través de las coberturas analizadas y la precipitación incidente en los eventos analizados.

Durante el periodo de evaluación se observaron variaciones entre el pH de la Pi y de las Pd de las especies estudiadas. De acuerdo con los resultados, es razonable suponer que la lluvia, al fluir por las coberturas arbóreas, se recarga de sales minerales depositadas en el follaje, lo que ocasiona variaciones del pH en Pd respecto de Pi. El cambio más significativo se presentó en la Pd del dosel de *A. farnesiana*, con un promedio general de 7.19, con respecto a la Pi con valor promedio de 6.88, mientras que las Pd del MET y de *L. leucocephala* mostraron menos alteraciones.



**Figure 3. Variation of the pH in the throughfall of each plant canopy and in the gross rainfall (Pi). MET: Tamaulipan thornscrub.**

**Figura 3. Variación del pH en la precipitación directa de cada dosel vegetal y en la precipitación incidente (Pi). MET: matorral espinoso tamaulipeco.**

In a similar way, Abbasian, Attarod, Sadeghi, Van Stan, and Hojjati (2015) evaluated the nutrient input in Pd of a plantation of *Picea abies* (L.) Karst and a forest of *Fagus orientalis* Lipsky in northern Iran, and reported pH values between 7 and 7.5 for both species. These values are similar to the results for *A. farnesiana* and *C. hookeri* considered slightly alkaline, while *C. greggii*, MET and *L. leucocephala* had slight acidity. In northeastern Mexico, Cantú and González (2001) observed that the pH values of Pd in the canopies of pine (6.2), oak (6.3) and pine-oak (6.3) were more acidic than gross rainfall (6.6).

Ef recorded a total of 24 events, which were measured only in *A. farnesiana*, *C. hookeri* and *C. greggii*, showing mean pH values of 6.63, 6.64 and 6.45, respectively; with a slight increase in acidity compared to Pi (6.74) (Figure 4). This result coincides with that of Yáñez et al. (2014), who evaluated the hydrological properties of a fragment of MET and indicated that the pH for Pi (7.4) decreased when circulating through this precipitation redistribution pathway (Ef=6.9), which could have been caused by the presence and dragging of organic acids and other particles present in the stem component.

#### Electrical conductivity

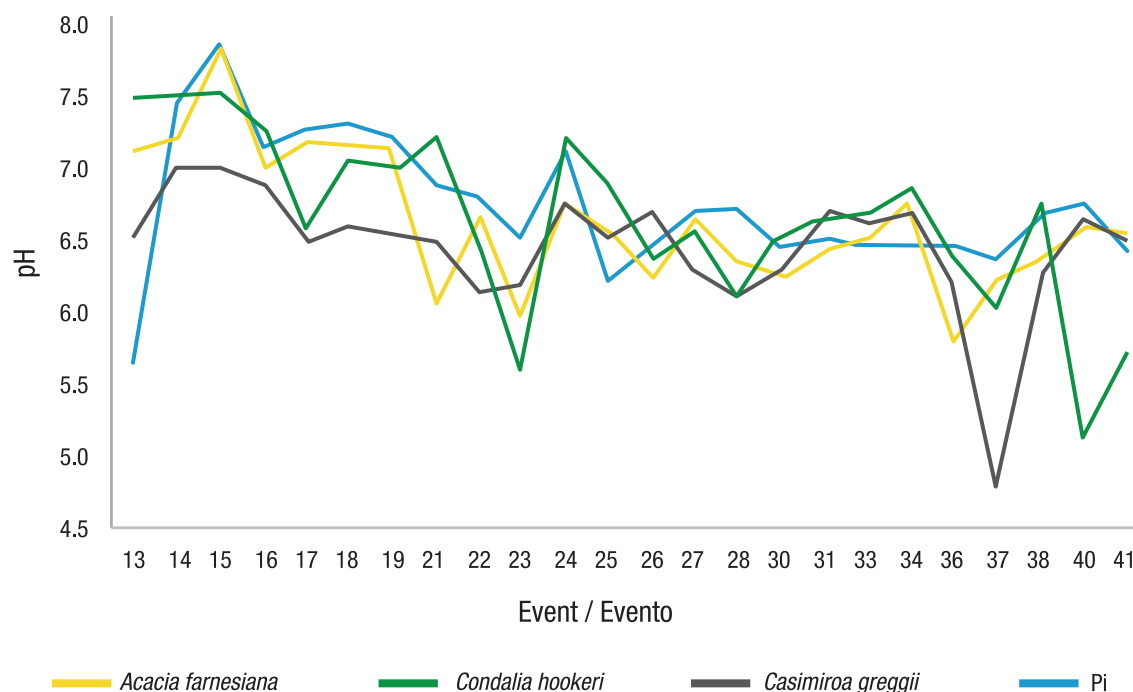
The Kruskal-Wallis test did not show significant statistical differences ( $P > 0.05$ ) in the EC between the paths circulating through the analyzed coverages (Pd and Ef) and Pi in the analyzed events.

The results indicate an increase of the EC to the passage of water through the canopies in relation to

En la Figura 3 se observa que en el evento 13, la Pi presentó pH de 5.65 (ligeramente ácido), el cual fue menor con respecto a las determinadas en las Pd, donde el agua de lluvia, al fluir por el dosel de cada especie, sufrió un cambio significativo reduciendo su acidez a consecuencia del arrastre de cationes como el K y Mn. Por otra parte, en los eventos 32 y 35 ocurrió lo contrario, específicamente en la parcela de MET se observó que la Pd, al momento de fluir por el dosel de los árboles, presentaba acidificación con diferencia de 1.4 con relación al pH de Pi; cabe señalar que ambos eventos mostraron precipitaciones menores de 5 mm.

La tendencia de decremento del pH al pasar por el dosel vegetal también ha sido documentada en otros ecosistemas y se ha atribuido principalmente a la presencia de ácidos orgánicos y otras partículas volátiles en las estructuras arbóreas, así como al volumen de la Pd y Ef, lo cual pudo haber ocurrido en la parcela de MET en los eventos 32 y 35. Por ejemplo, Jiménez et al. (2006) mostraron que el pH de la Pi presentó un valor de 5.58 con ligero aumento a su paso por las copas de los árboles, alcanzando valores de 5.83 en *Vochysia ferruginea* Mart., 5.98 en *Vochysia guatemalensis* Standl. y 5.96 en un bosque secundario.

Similarmente, Abbasian, Attarod, Sadeghi, Van Stan, y Hojjati (2015) evaluaron el aporte de nutrientes en la Pd de una plantación de *Picea abies* (L.) Karst y un bosque de *Fagus orientalis* Lipsky en el norte de Irán, y reportaron valores de pH entre 7 y 7.5 para ambas especies. Estos valores son similares a los resultados de *A. farnesiana* y *C. hookeri* considerados ligeramente alcalinos, mientras



**Figure 4. Behavior of pH in stemflow in three species and in gross rainfall (Pi).**

**Figura 4. Comportamiento del pH en el escurrimiento fustal en tres especies y en la precipitación incidente (Pi).**

that observed in Pi ( $59.93 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), due to the deposit of solids and mineral salts. The Pd with the highest mean EC value in the 41 events evaluated corresponds to *C. hookeri* with  $191.36 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , followed by the canopy of MET, *A. farnesiana*, *L. leucocephala* and *C. greggii* with  $166.73$ ,  $155.13$ ,  $129.10$  and  $125.34 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , respectively (Figure 5).

The EC analysis in Ef showed a similar behavior to Pd, recording values of  $56.49 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  in Pi, while *A. farnesiana* had the highest records with  $219.16 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , followed by *C. hookeri* and *C. greggii* with  $155.57$  and  $92.01 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , respectively (Figure 6). The results are similar to those found by Yáñez et al. (2014) in the MET evaluation, where they recorded values of  $71.7 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  for Pi,  $145 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  for Pd and  $126.8 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  for Ef.

The dragging of cortical anions and the low cation release are responsible for the increase in electrical conductivity. Pérez, Cetina, Aldrete, Fenn, and Landois (2006) mention that the increase of the EC of Ef and Pd, with respect to Pi, can be justified by the concentration effect, because when the quantity and occurrence of rainfall events decrease there is a greater accumulation of ions in the atmosphere, which are washed away by the later rain.

## Conclusions

The annual accumulation allowed detecting variations in the contributions between gross rainfall (Pi),

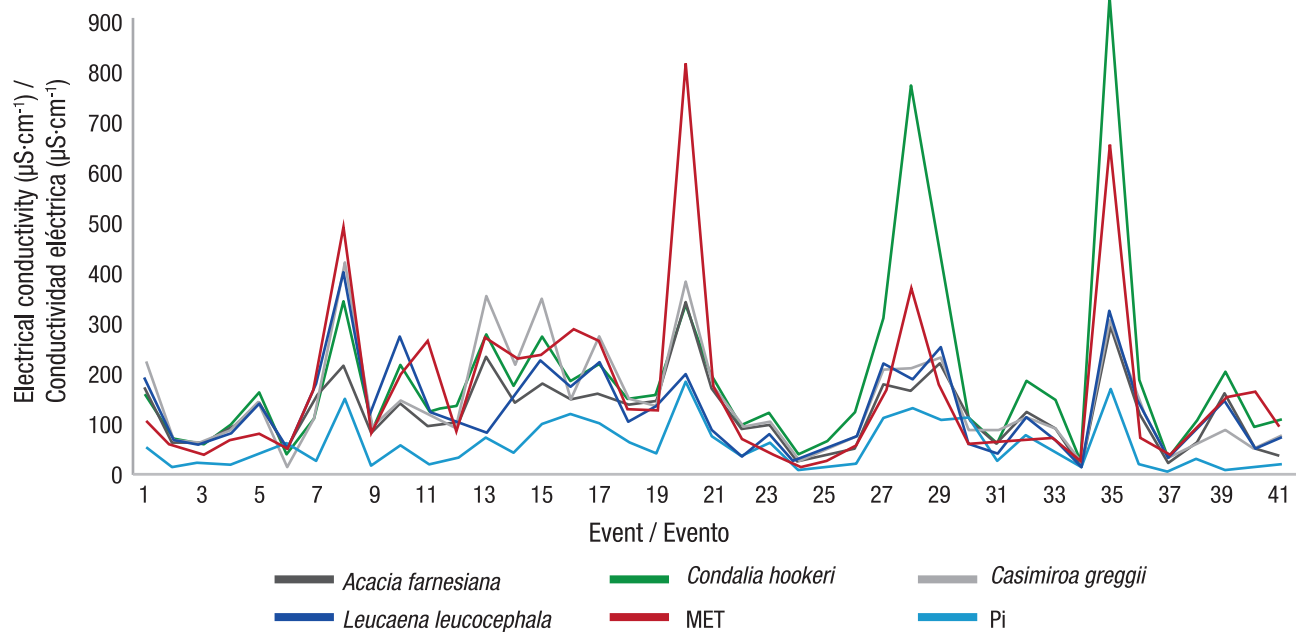
que *C. greggii*, el MET y *L. leucocephala* presentaron una acidez ligera. En el noreste de México, Cantú y González (2001) observaron que los valores de pH de la Pd en los doseles de pino (6.2), encino (6.3) y pino-encino (6.3) fueron más ácidos que la precipitación incidente (6.6).

La vía de Ef registró un total de 24 eventos, la cual se midió solo en *A. farnesiana*, *C. hookeri* y *C. greggii*, mostrando valores medios de pH de 6.63, 6.64 y 6.45, respectivamente; presentando ligero aumento en la acidez en comparación con Pi (6.74) (Figura 4). Este resultado coincide con el de Yáñez et al. (2014), quienes evaluaron las propiedades hidrológicas de un fragmento de MET e indicaron que el pH para Pi (7.4) disminuyó al circular por esta vía de redistribución de la precipitación (Ef = 6.9), lo cual pudo haber sido provocado por la presencia y arrastre de ácidos orgánicos y otras partículas presentes en el componente fustal.

## Conductividad eléctrica

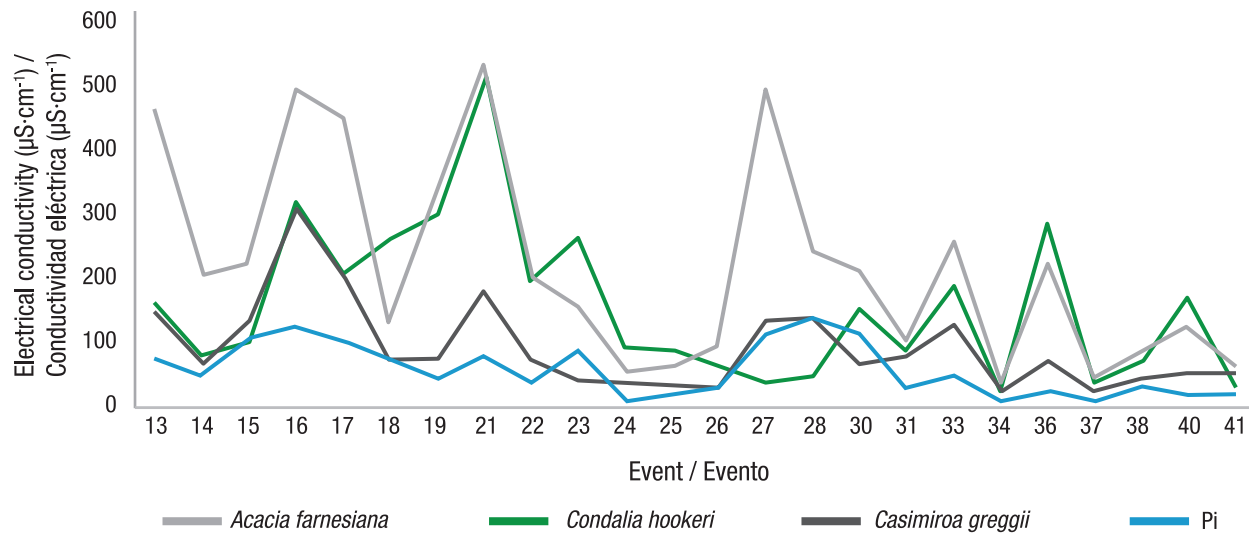
La prueba de Kruskal-Wallis no evidenció diferencias estadísticas significativas ( $P > 0.05$ ) en la CE entre las vías que circulan a través de las coberturas analizadas (Pd y Ef) y la Pi en los eventos analizados.

Los resultados indican incremento de la CE al paso del agua por los doseles en relación con la observada en Pi ( $59.93 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), a causa del depósito de sólidos y sales minerales. La Pd con el valor medio más alto de CE en los 41 eventos evaluados corresponde a *C. hookeri* con



**Figure 5. Behavior of electrical conductivity in throughfall for each plant canopy and gross rainfall (Pi). MET: Tamaulipan thornscrub.**

**Figura 5. Comportamiento de la conductividad eléctrica en la precipitación directa para cada dosel vegetal y en la precipitación incidente (Pi). MET: matorral espinoso tamaulipeco.**



**Figure 6. Behavior of electrical conductivity in stemflow in three species and gross rainfall (Pi).**

**Figura 6. Comportamiento de la conductividad eléctrica en el escurrimiento fustal en tres especies y en la precipitación incidente (Pi).**

throughfall (Pd) and stemflow (Ef), stating that the Pd pathway is the one that deposits nutrients to the soil to the greatest extent. In general, no statistical differences were found in the total annual contribution of micro and macronutrients between the five coverages in 41 rainfall events. The benefits offered by rainfall and scrub vegetation in the cycling and enrichment of nutrients to the soil have been established, allowing the proposal of conservation, restoration and use strategies for this type of ecosystem.

### Acknowledgements

The authors wish to express their gratitude to the Faculty of Forest Sciences of the UANL and to CONACYT for the funding of this research, through the project Fondo Ciencia Básica SEP-CONACYT, 250732.

### End of English version

### References / Referencias

- Abbasian, P., Attarod, P., Sadeghi, S. M. M., Van Stan, J. T., & Hojjati, S. M. (2015). Throughfall nutrients in a degraded indigenous *Fagus orientalis* forest and a *Picea abies* plantation in the North of Iran. *Forest Systems*, 24(3), 2171–9845. doi: 10.5424/fs/2015243-06764
- André, F., Jonard, M., & Ponette, Q. (2008). Effects of biological and meteorological factors on stemflow chemistry within a temperate mixed Oak-beech stand. *Science of the Total Environment*, 393(1), 72–83. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.12.002
- Béjar, P. S., Cantú, S. I., Domínguez, G. T., González, R. H., Marmolejo, M. J., Yáñez, D. M., & Luna, R. E. (2018). Redistribución de la precipitación y aporte de nutrimentos en *Pinus cooperi* C.E. Blanco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 94–120. doi: 10.29298/rmcf.v9i50.237
- Cantú, S. I., & González, R. H. (2001). Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology*, 21(12-13), 1009–1013. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/11847169>
- Dawoe, E. K., Barnes, V. R., & Oppong, S. K. (2018). Spatio-temporal dynamics of gross rainfall partitioning and nutrient fluxes in shaded-cocoa (*Theobroma cocoa*) systems in a tropical semi-deciduous forest. *Agroforestry Systems*, 92(2), 397–413. doi: 10.1007/s10457-017-0108-3
- Duarte, A. F., Gioda, A., Ziulli, R., & Duó, D. (2013). Contaminación atmosférica y deposición húmeda en la Amazonia brasileña. *Revista Cubana de Salud Pública*, 39(4), 627–639. Retrieved from [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-34662013000400002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662013000400002)

191.36  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , seguido del dosel de MET, *A. farnesiana*, *L. leucocephala* y *C. greggii* con 166.73, 155.13, 129.10 y 125.34  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , respectivamente (Figura 5).

El análisis de la CE en el Ef mostró un comportamiento similar a Pd, registrando valores de 56.49  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  en Pi, mientras que *A. farnesiana* presentó los registros más elevados con 219.16  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , seguida de *C. hookeri* y *C. greggii* con 155.57 y 92.01  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , respectivamente (Figura 6). Los resultados son similares a los encontrados por Yáñez et al. (2014) en la evaluación de MET, donde registraron valores de 71.7  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  para Pi, 145  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  para Pd y 126.8  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  para Ef.

El arrastre de aniones corticales y la poca cesión de cationes son responsables del aumento en la conductividad eléctrica. En general, Pérez, Cetina, Aldrete, Fenn, y Landois (2006) mencionan que el incremento de la CE de Ef y Pd, respecto a Pi, puede justificarse por el efecto de concentración, ya que al disminuir la cantidad y ocurrencia de eventos de lluvia hay acumulación mayor de iones en la atmósfera, los cuales son lavados por la lluvia posterior.

### Conclusiones

La acumulación anual permitió detectar variaciones en los aportes entre precipitación incidente (Pi), precipitación directa (Pd) y escurrimiento fustal (Ef), manifestando claramente que la vía de Pd es la que deposita nutrientes al suelo en mayor medida. En general, no se encontraron diferencias estadísticas del aporte anual total de micro y macronutrientes entre las cinco coberturas en 41 eventos de lluvia. Los beneficios que ofrecen la precipitación y la vegetación de matorral en el ciclaje y enriquecimiento de nutrientes al suelo han quedado establecidos, permitiendo proponer estrategias de conservación, restauración y aprovechamientos para este tipo de ecosistema.

### Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL y al CONACYT por el financiamiento de esta investigación, a través del proyecto Fondo Ciencia Básica SEP-CONACYT, 250732.

Fin de la versión en español



- Germer, S., Elsenbeer, H., & Moraes, J. M. (2006). Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondônia, Brazil). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(3), 383–393. doi: 10.5194/hess-10-383-2006.
- Germer, S., Zimmermann, A., Neill, C., Krusche, A. V., & Elsenbeer, H. (2012). Disproportionate single-species contribution to canopy-soil nutrient flux in an Amazonian rainforest. *Forest Ecology and Management*, 267, 40–49. doi: 10.1016/j.foreco.2011.11.041
- González, R. H., Ramírez, L. R. G., Cantú, S. I., Gómez, M. M. V., & Uvalle, S. J. I. (2010). Composición y estructura de la vegetación en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*, 29, 91–106. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-27682010000100004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682010000100004)
- International Business Machines (IBM). (2013). IBM SPSS Statistics for Windows, version 22.0. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- Jaramillo, R. A. (2003). La lluvia y el transporte de nutrimentos dentro de ecosistemas de bosque y cafetales. *Cenicafé*, 54(2), 134–144. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10778/249>
- Jiménez, R. C., Calvo, A. J. C., & Arias, A. D. (2006). Lavado de nutrientes en plantaciones forestales de *Vochysia ferruginea* Mart. y *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm., Sarapiquí, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 3(8), 16–26. Retrieved from <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/512/439>
- Levia, D. F., & Herwitz, S. R. (2005). Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. *CATENA*, 64(1), 117–137. doi: 10.1016/j.catena.2005.08.001
- Lida, S. I., Tanaka, T., & Sugita, M. (2005). Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology*, 315, 154–166. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.024
- Lilienfein, J., & Wilcke, W. (2004). Water and element input into native, agri-and silvicultural ecosystems of the Brazilian savanna. *Biogeochemistry*, 67(2), 183–212. doi: 10.1023/B:BI0G.0000015279.48813.9d
- Liu, W., Fox, J. E., & Xu, Z. (2003). Nutrient budget of a montane evergreen broad-leaved forest at Ailao Mountain National Nature Reserve, Yunnan, southwest China. *Hydrological Processes*, 17(6), 1119–1134. doi: 10.1002/hyp.1184
- Návar, J., González, J. M., & González, H. (2009). Gross precipitation and throughfall chemistry in legume species planted in Northeastern México. *Plant and Soil*, 318(1-2), 15–26. doi: 10.1007/s11104-008-9812-0
- Pérez, S. M., Cetina, A. V. M., Aldrete, A., Fenn, M. E., & Landois, L. L. (2006). Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México. *Agrociencia*, 40(2), 239–248. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/302/30240209.pdf>
- Segovia, Z. J. A., Delgadillo, H. F., Lares, R. M. L., Huerta, D. M. A., Muñoz, B. A., & Torres, D. E. V. (2009). Aporte atmosférico y concentración de hierro disuelto en la capa superficial del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 35(1), 75–90. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-38802009000100006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802009000100006)
- Shen, W., Ren, H., Jenerette, G. D., Hui, D., & Ren, H. (2013). Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence. *Atmospheric Environment*, 64, 242–250. doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.10.015
- Staelens, J., De-Schrijver, A., Verheyen, K., & Verhoest, N. E. (2008). Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: Influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrological Processes*, 22(1), 33–45. doi: 10.1002/hyp.6610
- Taghi, A. M., Attarod, P., & Bayramzadeh, V. (2013). The role of rainfall size in canopy interception loss: An observational study in a typical beech forest. *Middle East Journal of Scientific Research*, 13(7), 876–882. doi: 10.5829/idosi.mejsr.2013.13.7.2721
- Yáñez, D. M. I., Cantú, S. I., González, R. H., & Uvalle, S. J. I. (2014). Redistribución de la precipitación en tres especies arbustivas nativas y una plantación de eucalipto del noreste de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(2), 71–84. Retrieved from [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222014000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Zhang, Y. F., Wang, X. P., Pan, Y. X., & Hu, R. (2016). Variations of nutrients in gross rainfall, stemflow, and throughfall within revegetated desert ecosystems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 183. doi: 10.1007/s11270-016-2878-z