

Vol. 25(1) • Bogotá-Colombia • Enero-junio de 2022

# Colombia FORESTAL



Publicación de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales - Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal • ISSN 0120-0739  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

# Colombia FORESTAL



Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Colomb. For. Volumen 25 Número 1. Bogotá, D.C. Enero-Junio de 2022 ISSN 0120-0739  
Publicación semestral

## Editor

**René López Camacho, Ph.D(c).**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

## Comité editorial

**Andrés Avella Muñoz, Ph.D.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

**Camila Pizano, Ph.D.**  
Universidad Icesi. Colombia.

**Carlos Alfonso Zafra Mejía, Ph.D.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

**Beatriz Salgado Negret, Ph.D.**  
Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

**Esteban Galeano Gómez, Ph.D.**  
Universidad de Alberta. Canadá.

**Julio Eduardo Beltrán Vargas, Ph.D.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

**Olga Patricia Pinzón, Ph.D.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

**René López Camacho, Ph.D(c).**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente  
y Recursos Naturales. Colombia.

## Fotografía de la cubierta

Título: Senderos en el robledal  
Fotografía por: Ever Octavio Suárez Barajas  
Lugar: Vereda El Pozo, sector el alto, municipio San José de Miranda, Santander.

## Preparación editorial y diseño

Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico / Universidad Distrital Francisco José de Caldas

## Coordinación editorial-CIDC

Fernando Piraquive

## Corrección de estilo para español

Lorena Niño

## Corrección de estilo en inglés

Esteban Galeano Gómez, Ph.D.  
Universidad de Alberta. Canadá.

José Daniel Gutiérrez Mendoza  
Corrector de estilo independiente

## Diagramación electrónica y diseño de cubierta

Andrés Mauricio Enciso

## Grupo de árbitros del presente número

**Álvaro Javier Duque Montoya, Ph.D.**  
Universidad Nacional de Colombia. Colombia

**Amanda Silva Parra, Ph.D.**  
Universidad de los Llanos. Colombia.

**María del Carmen Ojeda, Ph.D.**  
Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

**Cesar Augusto Polanco Tapia, Ph.D.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

**Eulogio José Chacón Moreno, Ph.D.**  
Universidad de Lérida. España.

**Guillermo Trincado, Ph.D.**  
Universidad Austral de Chile. Chile.

**Jamal Naser Abedalrahman, Ph.D.**  
Universidad de Wasit. Iraq.

**Mauricio Corredor Rodríguez, Ph.D.**  
Universidad de Antioquia. Colombia.

**Mauricio Jerez-Rico, Ph.D.**  
Universidad de Los Andes. Venezuela.

**Miguel Eugenio Cadena, Ph.D.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

**Rafael Calama Sainz, Ph.D.**  
INIA-CIFOR. España.

**Rebeca Menchaca García, Ph.D.**  
Universidad Veracruzana. México.

**Susana Rodríguez Buritica, Ph.D.**  
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Colombia.

## Comité científico

**Antoine Cleff, Ph.D.**  
Universidad de Amsterdam. Holanda.

**Catalina Segura, Ph.D.**  
Oregon State University. Estados Unidos de América.

**Felipe Bravo Oviedo, Ph.D.**  
Universidad de Valladolid. España.

**Guillermo Trincado, Ph.D.**  
Universidad Austral de Chile. Chile.

**Jesús Orlando Rangel, Ph.D.**  
Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

**Jorge Ignacio del Valle, Ph.D.**  
Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

**Joseph W. Veldman, Ph.D.**  
Universidad Estatal de Iowa. Estados Unidos de América.

**Pablo Stevenson, Ph.D.**  
Universidad de los Andes. Colombia.

**Sandra Rodríguez Piñeros, Ph.D.**  
Universidad Autónoma de Chihuahua. México.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede Vivero – Avenida Circunvalar – Venado de Oro, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co

Portal web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor>

Colombia Forestal está bajo una licencia Creative Commons–4.0 Colombia License.



Atribución-Compartir Igual

# Contenido

## Artículos de Investigación Científica y Tecnológica

CHANGES IN SOIL QUALITY ASSOCIATED WITH THE IMPLEMENTATION OF ECOLOGICAL AGRICULTURE TECHNIQUES IN COFFEE PLANTS UNDER DIFFERENT COVERINGS <b>Cambios en calidad del suelo asociados a la aplicación de técnicas de agricultura ecológica en plantas café bajo diferentes coberturas</b> Paula Daniela Gómez Pinzon, Leaddy Karolinna Ariza Vargas, Lizeth Manuela Avellaneda-Torres	5
USING INVERSE MODELING BY HYDRUS-1D TO PREDICT SOME SOIL HYDRAULIC PARAMETERS FROM SOIL WATER EVAPORATION <b>Uso del modelado inverso por HYDRUS-1D para predecir algunos parámetros hidráulicos del suelo a partir de la evaporación del agua del suelo</b> Esam Mohammed, Salahaldeen Abid-Alziz AL-Qassab, Faris Akram Salih AL-Wazan	21
EXPLORACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS BOSQUES PERIURBANOS EN MÉRIDA, VENEZUELA <b>Exploration and comparison of spatial distribution of peri-urban forests in Mérida, Venezuela</b> Deyriana del Valle Vásquez-Rivas, Jesús Enrique Andrades-Grassi, Luis E. Gámez y Gerardo Gabriel Rodríguez L.	36
VEGETACIÓN LEÑOSA DE UN REMANENTE DE BOSQUE SECO TROPICAL EN EL CARIBE COLOMBIANO <b>Woody vegetation of a tropical dry forest remnant in the Colombian Caribbean</b> Viviana Londoño-Lemos, Juan Tapasco-García, Orlando Escobar-Hadechini, Santiago Madriñán	51
REGENERACIÓN DE YEMAS ADVENTICIAS EN SEGMENTOS DE HOJAS Y ENTRENUDOS DE <i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl. <b>Regeneration of adventitious buds on leaf and internode segments of <i>Balfourodendron riedelianum</i> (Engl.) Engl.</b> Evelyn Raquel Duarte	67
FUNCIÓN AHUSAMIENTO-VOLUMEN COMERCIAL DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltldl. & Cham. EN VARIAS REGIONES DE MÉXICO <b>Commercial taper-volume function of <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltldl. &amp; Cham. in several regions of Mexico</b> Juan Carlos Guzmán-Santiago, Benedicto Vargas-Larreta, Martín Gómez-Cárdenas, Gerónimo Quiñonez-Barraza	77



**ARTÍCULOS**  
**DE INVESTIGACIÓN**  
**CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Changes in Soil Quality Associated with the Implementation of Ecological Agriculture Techniques in Coffee Plants under Different Coverings

### Cambios en calidad del suelo asociados a la aplicación de técnicas de agricultura ecológica en plantas café bajo diferentes coberturas

Paula Daniela Gómez Pinzon<sup>1</sup> , Leaddy Karolinna Ariza Vargas<sup>1</sup>   
y Lizeth Manuela Avellaneda-Torres<sup>1\*</sup> 

Gómez-Pinzón, P. D., Ariza-Vargas, L. K., & Avellaneda-Torres, L. M. (2022). Changes in Soil Quality Associated with the Implementation of Ecological Agriculture Techniques in Coffee Plants under Different Coverings. *Colombia Forestal*, 25(1), 5-20.

**Recepción:** 27 de mayo 2021

**Aprobación:** 17 de agosto 2021

#### Abstract

The aim of this research was to evaluate the changes in the soil quality associated with the implementation of ecological agriculture (EA) techniques in coffee plantations under different coverings (banana, mandarin, and a mix of citrus fruits) in San José de Pare, Boyacá. To this effect, changes in physicochemical parameters, the abundance of functional groups of microorganisms (phosphate solubilizers, cellulolytic microorganisms, nitrogen fixers), and enzymatic activities (acid and alkaline phosphatase,  $\beta$ -glucosidase, urease, and protease) were determined. The soil samples were collected on a bimonthly basis for a period of ten months in plots cultivated with coffee plantations with three different coverings: banana, mandarin, and a mix of citrus fruits. The results showed modifications in the soil quality indicators as a consequence of the application of EA techniques, finding a significant increase in the content of phosphorus, carbon, phosphate solubilizing bacteria and fungi, and cellulolytic fungi. In

contrast, no significant changes were observed for enzymatic activity.

**Keywords:** agroecology, enzymes, agroforestry systems, microorganisms, green revolution

#### Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar cambios de la calidad del suelo asociados a la implementación de técnicas de agricultura ecológica (AE) en cafetales bajo diferentes coberturas en San José de Pare, Boyacá. Para el cumplimiento de este objetivo se determinaron cambios en parámetros fisicoquímicos, abundancia de grupos funcionales de microorganismos (solubilizadores de fosfatos, celulolíticos, fijadores de nitrógeno) y actividades enzimáticas (fosfatasa acida y alcalina,  $\beta$ -glucosidasa, ureasa y proteasa). Las muestras de suelo se recolectaron de manera bimensual durante un periodo de diez meses en parcelas con cultivo de café con tres diferentes coberturas: plátano, mandarina y una mezcla de cítricos. Los resultados mostraron

<sup>1</sup> Environmental Engineering Program, Department of Engineering, Universidad Libre, Bogotá D.C., Colombia.

\* Autor para correspondencia: [lizethm.avellaneda@unilibre.edu.co](mailto:lizethm.avellaneda@unilibre.edu.co).

modificaciones de los indicadores de calidad del suelo como consecuencia de la aplicación de técnicas de AE, encontrando un aumento significativo en el contenido de fósforo, carbono, bacterias y hongos solubilizadores de fosfato y hongos celulolíticos.

En contraste, no se observaron cambios significativamente relevantes en la actividad enzimática.

**Palabras clave:** agroecología, enzimas, sistemas agroforestales, microorganismos, revolución verde

## INTRODUCTION

Ecological Agriculture (EA) aims for a natural and friendly relationship with the environment to promote plant and animal biodiversity (de los Ríos *et al.*, 2016), unlike the Green Revolution, which is associated with the extensive use of chemical fertilizers and heavy-duty machinery (Ceccon, 2008). This has led agriculture to several negative impacts, creating simplified and unstable ecosystems and causing environmental deterioration (Rubio-Sánchez, 2016).

It is in this context that EA uses techniques which are favorable to the environment with changes in crop rotation and the use of green manures, vermicomposts (worm humus), poultry manure, biofertilizers, and efficient microorganisms (EM) in order to maintain soil productivity (Guiberteau & Labrador, 1991).

Another productive and environmentally friendly strategy is the implementation of agroforestry systems, also called SAF, a sustainable alternative that helps increase soil productivity (Casanova-Lugo *et al.*, 2011). In addition, these systems contribute to multiple environmental services such as mitigating the conflict of land use in Colombia, especially considering that our country has a great diversity of species. This allows for the diversification of said systems, of which coffee production is one of the predominant modalities (Henao, 2020).

These traditional techniques use the resources that are available, namely organic fertilizers, in this case worm humus, which can be an efficient solution to replace mineral fertilizers, as they help maintain balance in the soil (Milanés

*et al.*, 2005). Another technique that has been implemented is the use of biofertilizers that improve and conserve the physical, chemical, and biological conditions of the soil, given that a large part of the organic matter comes from enzymatic digestion by microorganisms, and it is from this organic matter that we obtain the nutrients that are easily assimilated by the soil (Trejo-Escareño *et al.*, 2013).

Moreover, EMs are also used as organic fertilizers in agriculture, with the great benefit of increased production, in addition to helping prevent and reduce the attack of pests and diseases. They are produced as a mixture of natural resources that is highly efficient and beneficial (Callisaya and Fernández, 2017). Finally, poultry manure provides benefits such as increased moisture retention, increased organic matter, and improved soil fertility through increased amounts of macro and micro-nutrients (González *et al.*, 2013).

It has been suggested that the implementation of these EA techniques, as well as the different covering options, provides several benefits to the soil. According to the National Commission for Biodiversity Knowledge and Use (*Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad*) (CONABIO, 2015), shade-grown coffee is particularly promising in terms of conservation, with benefits such as greater biomass, more soil nutrients, and microbial biodiversity, fewer weeds and harmful insects, and a better water and microclimate balance. Trees like orange, banana, and guava, among others, generate benefits to the soil by providing organic matter produced by leaf litter and atmospheric nitrogen



fixation (Ruelas-Mojardín, 2014). In Colombia, coffee is a product with special altitude, latitude, and climate conditions. This means that Colombian coffee culture has one fundamental requirement: the quality of the soil (FNC, 2012). This is why the agroecological conditions of San José de Pare, Boyacá, are suitable for coffee plantations; it has a cultivated area of 617 ha, with plants cultivated under the shade or coverings due to the high radiation that is emitted in this area (Alcaldía Municipal San José de Pare Boyacá, 2020).

Soil is one of the most important resources for life on the planet (García *et al.*, 2012). Therefore, physicochemical indicators such as gravimetric moisture, pH, CEC, phosphorus, organic carbon, and nitrogen are so important, since they allow determining the degree of vulnerability of a given soil depending on the activities it has been exposed to. This includes the buffering capacity of the soil and the availability of water and nutrients for plants and microorganisms. Biological indicators (phosphate solubilizing bacteria, phosphate solubilizing fungi, cellulolytic bacteria, cellulolytic fungi, and nitrogen fixing bacteria) show the diversity and abundance in soil components based on factors such as the presence of micro and macroorganisms, bacteria, earthworms, and soil fungi (Bautista *et al.*, 2004).

Another important indicator is soil enzymes, which are involved in microorganism activity. Together with other soil organisms, they are linked to energy transfer, biochemical processes, and environmental quality. Additionally, they are considered to be an important indicator of soil fertility (providing adequate amounts of nutrients) and agronomic, ecological, and anthropogenic influence (Doran & Parkin, 1994).

Finally, despite the importance of EA techniques for soils, there are still not enough studies showing possible changes in soil quality indicators as a result of the application of said techniques over time, specifically in coffee plantations under different coverings. For this reason, the

main question of this research is: what changes occur in the soil quality indicators of coffee plantations under different coverings, which are associated with the implementation of agriculture ecological techniques in the municipality of San José de Pare, Boyacá?

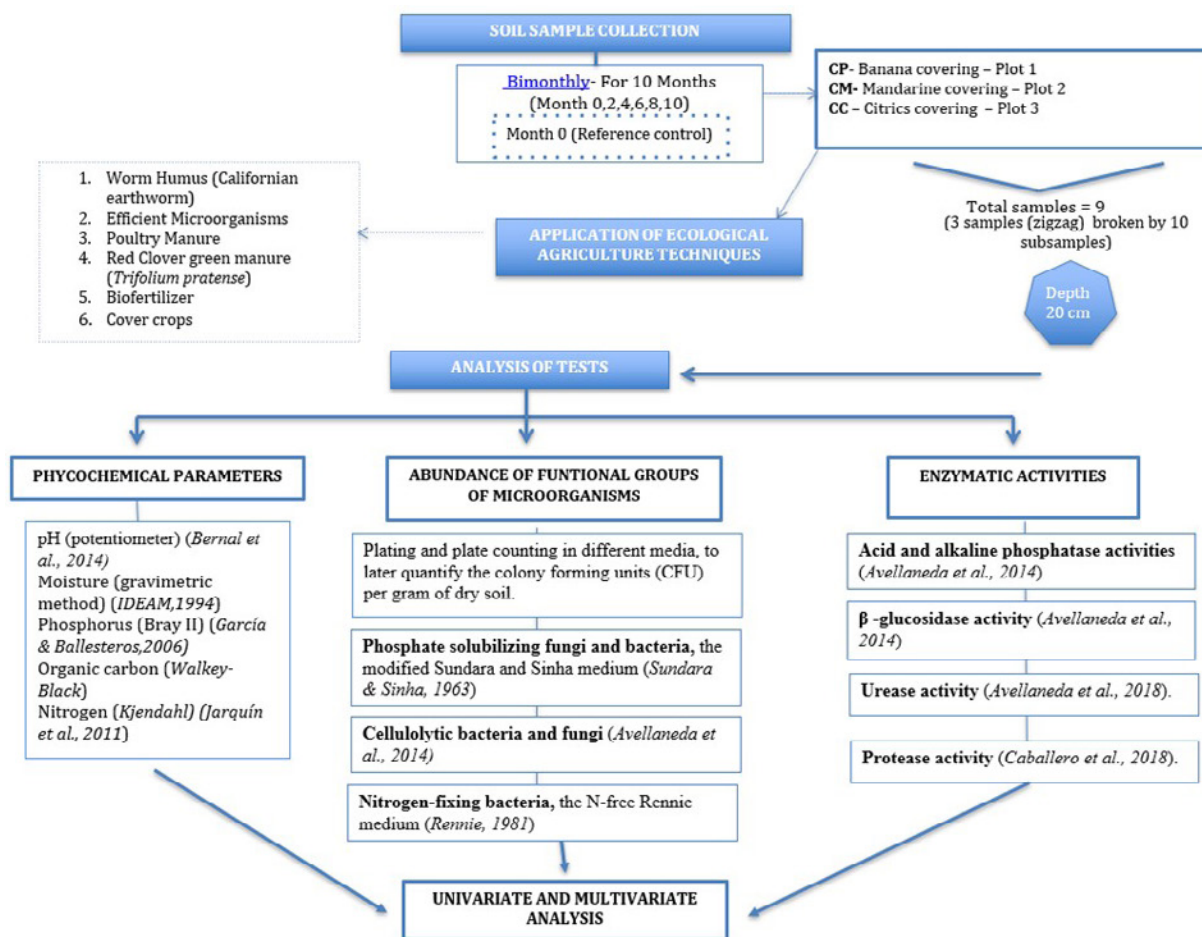
## MATERIALS AND METHODS

### Description of the study area

This research was carried out in a rural area located in the Colombian municipality of San José de Pare, in the department of Boyacá, at an altitude of 1545 m.a.s.l. and average temperatures of 13 and 24 °C, with the following geographical coordinates: 6°01.84' N longitude, 73°31' W latitude. This municipality is located in the Republic of Colombia, 217 km north of Bogotá DC, in the northeastern region of the department of Boyacá, and it shares borders with the municipalities of Chitaraque, Moniquirá, San José de Pare, Santana, and Togüi.

### Experimental design and soil sampling

As shown in Figure 1, sampling was carried out by selecting three coffee plots (twelve coffee plants in each plot) under three different coverings: banana trees (CP), mandarin trees (CM), and three citrus fruit trees (CC) (mandarin, lemon, and orange). The EA techniques applied were: 1) worm humus (Californian earthworm) (Milanés *et al.*, 2005); 2) biofertilizer, obtained from the mixture of legumes, molasses, yeast, chicha, poultry manure, rabbit manure, wood ash, and milk (Trejo-Escareño *et al.*, 2013); 3) efficient microorganisms (EM) from a mix of leaf litter, rice grits, molasses, and milk (Callisaya & Fernández, 2017); 4) poultry manure (González *et al.*, 2013); 5) Red clover green manures (*Trifolium pratense*) (Fonseca-López *et al.*, 2020); and 6) cover crops



**Figure 1.** Methodology for the application of EA techniques from soil sample collection

(Geissert et al., 2017). As the EA techniques were being applied, soil samples were collected on a bimonthly basis (months 0, 2, 4, 6, 8, 10) for ten months, for a total of 6 sampling moments. Each plot provided three samples composed of 10 different subsamples, which were taken in zigzag from the upper 20 cm of the soil. The soil samples were then homogenized, labeled, and stored in bags at different temperatures depending on their purpose: the bags for physicochemical analysis at room temperature, those for microorganism abundance analysis at 4 °C, and those for enzymatic activities at -20 °C. The samples were processed in the shortest possible time after sampling (maximum one week after collection).

### Physicochemical parameters of the soil

All samples underwent physicochemical analysis according to the following methods:

- pH (potentiometer)*: 1:1, soil:water. (Bernal et al., 2014).
- Moisture (gravimetric method)*: it consists of taking a soil sample, weighing it before and after drying, and calculating its moisture content. The soil sample is considered to be dry when its weight remains constant at a temperature of 105 °C (IDEAM, 1994).
- Phosphorus (Bray II)*: the soil phosphorus is extracted with 25 ml of the extractor solution of HCl 0.1N and NH<sub>4</sub>F 0.03N, shaken,

filtered, and the available phosphorus is colorimetrically quantified by reaction with chloromolybdic acid and stannous chloride to form a blue complex whose intensity is proportional to the amount of the element present (García & Ballesteros, 2006).

- d. *Organic carbon (Walkley-Black)*: this method is based on the oxidation of the organic carbon in the soil by means of a solution of potassium dichromate ( $K_2Cr_2O_4$ ) and the heat of the reaction generated by mixing with concentrated sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ). After a waiting time, the mixture is diluted, phosphoric acid is added to avoid  $Fe^{3+}$  interferences, and the residual potassium dichromate is titrated with ferrous sulfate ( $FeSO_4$  1N, pH 7) (Vela *et al.*, 2012).
- e. *Nitrogen (Kjendahl)*: which consists of three stages digestion, distillation and titration, where the sample is left in digestion with pure sulfuric acid, then an absorbent solution such as boric acid is used for the distillation stage and finally a titration with 1N sulfuric acid is performed (Jarquín *et al.*, 2011).

### Abundance of functional groups of microorganisms

To determine the abundance of functional microorganism groups, we performed plating and plate counting in different media, to later quantify the colony forming units (CFU) per gram of dry soil. For the seeding and counting of phosphate solubilizing fungi and bacteria, we used the modified Sundara and Sinha medium (Sundara & Sinha, 1963). The procedure was carried out by incubating the bacteria at 28 °C for 40 h and the fungi at 20 °C for six days; for cellulolytic bacteria and fungi, we used a medium whose only source of carbon was 1% carboxymethyl cellulose, where bacteria were incubated at 28 °C for 48 h and fungi at 20 °C for six days (Avellaneda-Torres *et al.*, 2014); and, finally, for the nitrogen-fixing bacteria, we used the N-free

Rennie medium (Rennie, 1981) and CFU plate count by maintaining the temperature at 28 °C for 48 h (Avellaneda-Torres *et al.*, 2020).

### Enzymatic activity

With the purpose of evaluating the enzymatic activities, we considered the association with phosphorus, carbon, and nitrogen cycles. For the phosphorus cycle, the study determined acid and alkaline phosphatase activities, which were quantified by determining the p-nitrophenol that was released after the incubation with p-nitrophenyl phosphate solution for 1 h at 37 °C. The p-nitrophenol was photometrically determined at 400 nm. For the carbon cycle, the  $\beta$ -glucosidase activity was determined by quantifying the p-nitrophenol released after the incubation with a p-nitrophenyl glucoside solution for 1 h, at 37 °C. The p-nitrophenol was photometrically determined at 400 nm. As for the nitrogen cycle, the urease activity was determined, which is based on the colorimetric determination at 690 nm of the released ammonia after incubation with a solution of urea for 2 h, at 37 °C (Avellaneda-Torres *et al.*, 2018). Finally, the study determined the protease activity by incubating the soil samples for 2 h at 50 °C using casein as substrate (Caballero-Vanegas *et al.*, 2018) after incubation for 2 h at 50 °C and a pH 8.1. In this method, the released amino acids reacted with the Folin-Ciocalteu reagent in an alkaline solution to form a blue complex that was colorimetrically evaluated (700 nm) (Avellaneda-Torres *et al.*, 2018).

### Statistical analysis

To determine if there were significant differences in the physicochemical parameters, the abundance of functional groups of microorganisms, and the enzymatic activities throughout the months of application of EA techniques in the soils with coffee plantations under three different coverings (CP, CM, and CC), we carried out univariate and multivariate data analyses. To this effect,

the assumptions of normality and homogeneity of variances were verified using the Kolmogorov-Smirnov and Barlett tests, respectively, followed by the Kruskal-Wallis tests with a *post-hoc* Mann-Whitney analysis to determine significant differences. The tests were performed with the Stats package (R Core Team, 2019). A principal component analysis (PCA) was also performed using the factoextra package (Kassambara & Mundt, 2020). The analyses were performed with the R statistical software, version 3.5.3. (R Core Team, 2019).

## RESULTS

### Physicochemical parameters

According to the results presented in Table 1, it appears that, on average, we can find a 29.3% for CP in the  $\Theta_g$ , which shows that it is a soil with good moisture content, as well as an average of 37.4 and

48.7% for CM and CC, respectively. This means that, according to its water content, it is a usable soil. In general, the pH in registers strongly acid values between (5.0 and 5.7), thus indicating that some of the elements that are available in the soil do not have adequate levels. On the other hand, we found an average CEC of 26.4 meq.100g<sup>-1</sup> for CP and 38.7 meq.100g<sup>-1</sup> for CM, which indicates that it is a medium CEC soil, whereas 41.4 meq.100g<sup>-1</sup> for CC imply a high CEC soil. Regarding the phosphorus content, an average of 30.6% was obtained for the three plots, indicating that phosphorus in the soil under study is at high levels. It was observed that carbon levels were high, as they ranged between 4.3 and 8.7%. Finally, nitrogen content values were high (between 0.4 and 0.9%).

According to Table 1, the  $\Theta_g$  shows fluctuations throughout the months with each of the coverings. However, they are not statistically significant. Moreover, the pH of the soils did not change significantly for the three evaluated coverings as

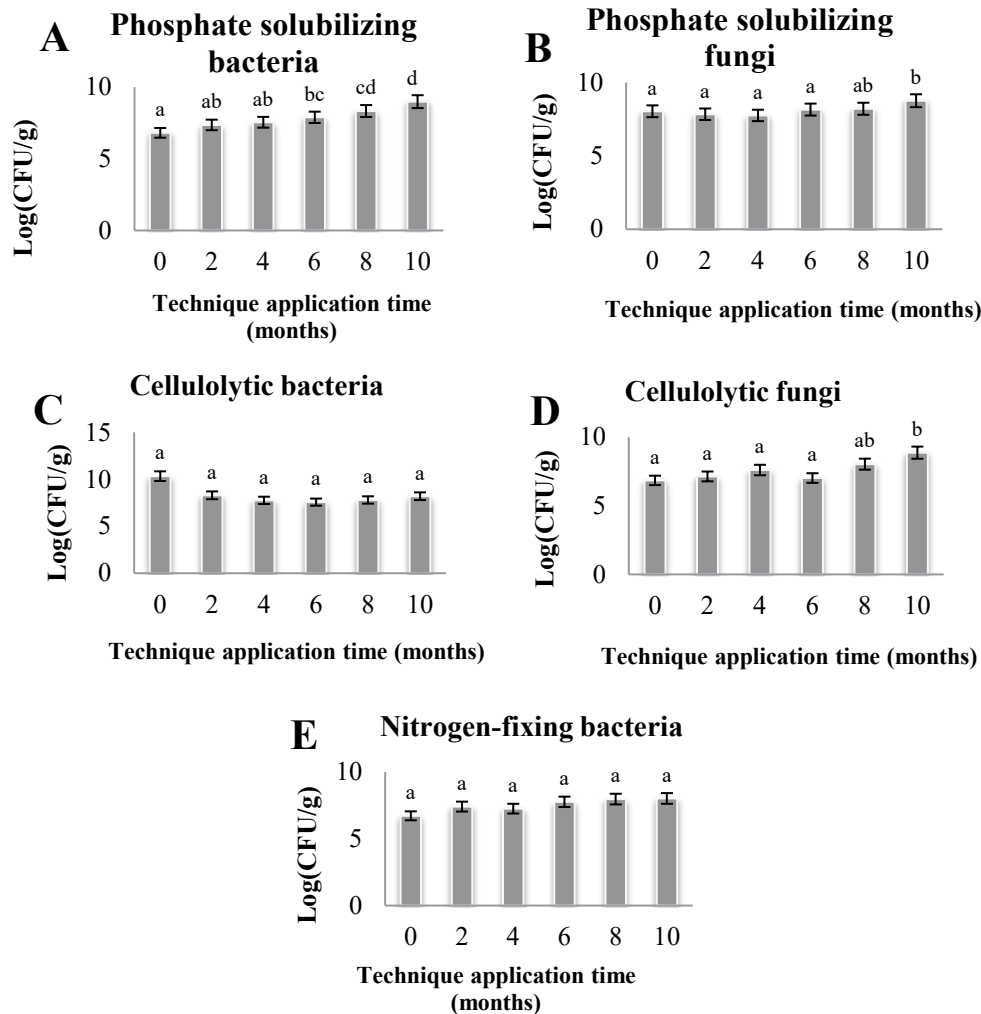
**Table 1.** Physicochemical parameters by coverings and time of application of EA techniques in months: gravimetric moisture ( $\Theta_g$ ), pH, cation exchange capacity (CEC) in meq.100g<sup>-1</sup>, phosphorus (P) in ppm, organic carbon (OC) in %, and nitrogen (N) in %. Different letters indicate statistically significant differences, whereas equal letters symbolize no significant difference ( $p < 0.05$ )

Covering	Month	$\Theta_g$	pH	CEC	P	OC	N
CP	0	47.9 a	5.4 a	25.7 a	22.3 a	4.3 a	0.4 a
	2	21.7 a	5.1 a	31.3 b	15.8 b	4.7 b	0.4 a
	4	33.1 a	5.1 a	28.9 c	30.9 c	5.1 bc	0.4 a
	6	29.6 a	5.1 a	23.3 a	31.9 c	5.2 c	0.4 a
	8	17.9 a	5.4 a	23.1 a	25.8 d	7.6 d	0.6 a
	10	25.7 a	5.4 a	26.0 a	44.7 e	8.6 e	0.7 a
	0	48.8 a	5.4 a	35.3 a	22.5 a	5.1 a	0.4 a
CM	2	45.6 ac	5.2 b	37.7 ab	18.9 b	5.1 a	0.4 a
	4	28.4 bc	5.2 ab	38.2 a	29.9 c	5.2 a	0.4 a
	6	27.4 b	5.4 ab	42.6 bc	31.3 c	8.7 bc	0.6 a
	8	46.8 a	5.2 ab	42.0 ac	32.1 c	8.7 b	0.7 a
	10	27.4 b	5.4 ab	36.7 a	45.4 d	8.3 c	0.7 a
	0	80.9 a	5.5 ab	45.0 a	27.3 a	4.5 a	0.4 a
	2	22.3 ab	5.1 a	38.3 ab	15.9 b	8.0 b	0.4 a
CC	4	48.9 b	5.3 ab	37.0 ab	34.6 cd	5.2 c	0.6 ab
	6	27.4 c	5.0 a	44.3 a	31.3 cd	5.2 c	0.5 ab
	8	45.6 b	5.7 b	37.1 b	31.8 d	8.1 b	0.9 b
	10	67.1 a	5.4 ab	47.0 a	59.5 e	8.0 b	0.8 b

the months EA technique application elapsed. In addition, there were no significant changes in the CEC during this period. For organic carbon, a significant increase was observed in the three coverings. The same behavior was seen in the case of phosphorus, where a significant increase was evident in each of the coverings, with the highest statistical increase in month 10 for both phosphorus and carbon. There was no significant change for nitrogen over the months of application of the EA techniques.

### Functional groups of microorganisms

The results for the abundance of functional groups of microorganisms show a statistically significant increase as the months of application of EA techniques elapsed in the case of phosphate solubilizing bacteria (Figure 2a). Phosphate solubilizing fungi (Figure 2b) show a significant increase, whereas cellulolytic bacteria (Figure 2c) did not show statistically significant changes during this period. Cellulolytic



**Figure 2.** Abundance of functional groups of microorganisms in counts for CP, CM, and CC. Different letters indicate statistically significant difference; equal letters symbolize no statistically significant difference  $p < 0.05$

fungi (Figure 2d) increased statistically during the last months of study, and, finally, nitrogen-fixing bacteria (Figure 2e) did not show any significant changes.

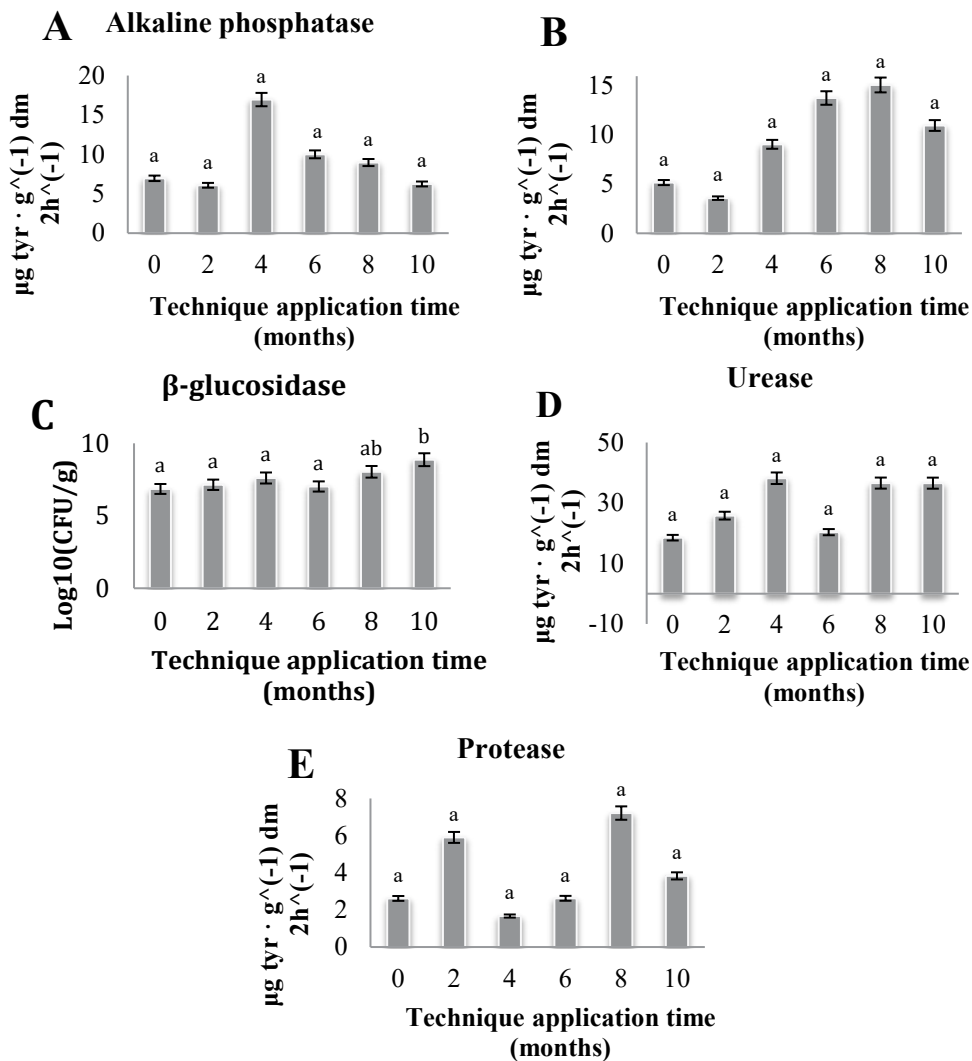
### Enzymatic activity

Figure 3 shows that there is no significant change in the enzymatic activity corresponding to alkaline phosphatase (Figure 3a), acid phosphatase (Figure 3b),  $\beta$ -glucosidase (Figure 3c), urease (Figure 3d), and protease (Figure 3e) during the months of application of

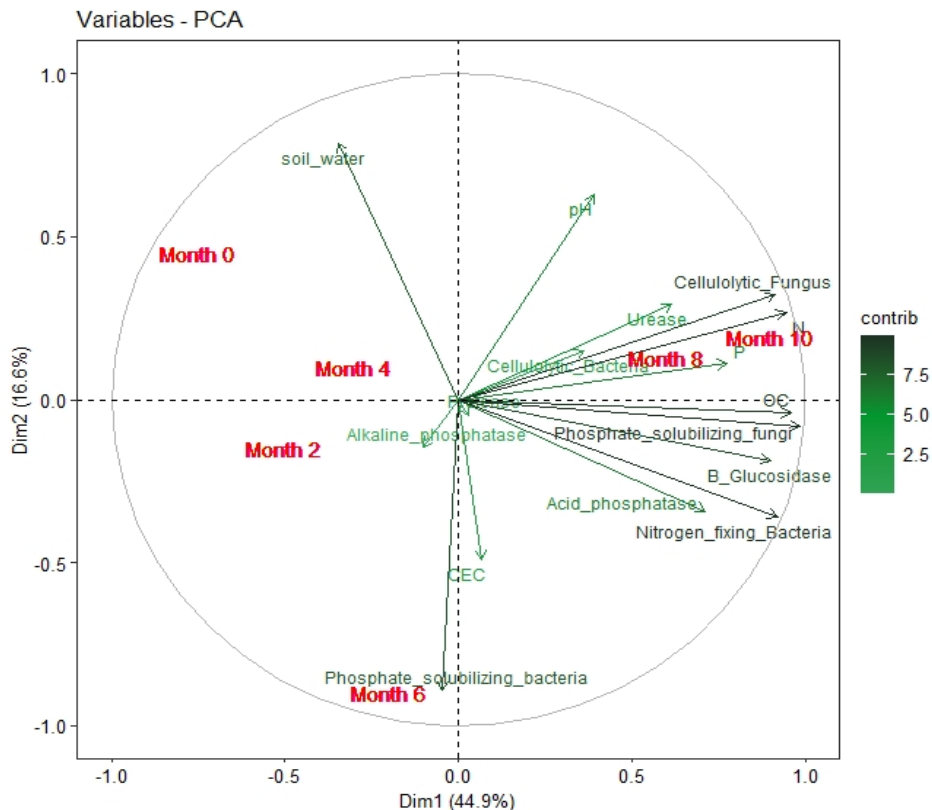
the EA techniques. On the other hand, the statistical analyses for enzymes in each crop (banana, mandarin, and citrus) accompanying the coffee plantations showed the same results, which is why they are not presented in this paper.

### Principal component analysis of different variables in response to EA techniques

The cumulative variance of the PCA in (Figure 4) was 60.2%, which constitutes an indicator of good



**Figure 3.** Average CP, CM, and CC enzymatic activity. Different letters indicate significant statistical difference, equal letters symbolize no significant statistical difference  $p < 0.05$



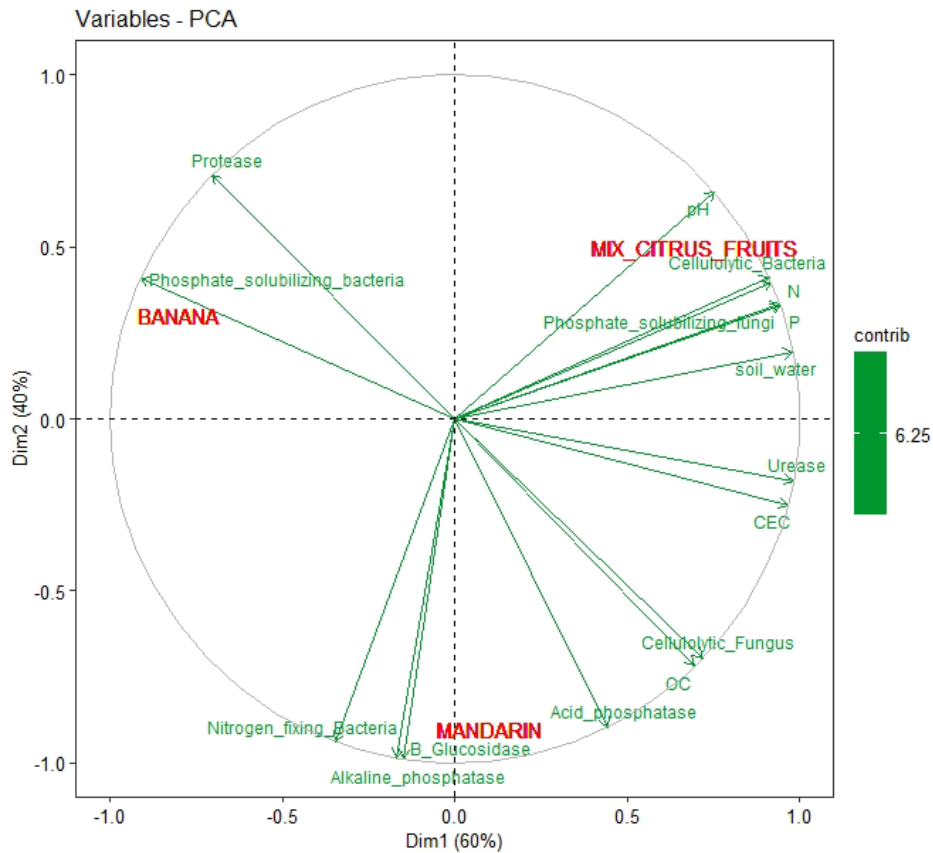
**Figure 4.** Principal component analysis of the parameters for the three plots from month 0 to month 10 of application of the EA techniques. CEC: cation exchange capacity, P: phosphorus, OC: organic carbon, and N: nitrogen.

quality in the analysis of the results. It can be observed that, towards the last two months of sampling and application of EA techniques, there is a correlation between the variables of phosphorus, organic carbon, phosphate solubilizing fungi, phosphate solubilizing bacteria, and cellulolytic fungi. pH, nitrogen, and enzymatic activities such as  $\beta$ -glucosidase and urease appear in a lower proportion. The behavior of these variables is opposite to that observed for gravimetric moisture, showing that the lower the soil moisture with respect to the months of application, the higher the percentages of the different variables opposite to it. Likewise, another inversely proportional relationship takes place between pH and phosphate solubilizing

bacteria, which indicates that the count of these bacteria depends on the change in soil pH.

**Component 1 has a variance of 60%, and, together with component 2 of variance 40, they represent 100% of the total variation.**

Figure 5 shows that the accumulated variance of the PCA was 100%, which indicates a low stress analysis for the understanding of the variables. It is observed that CP is correlated with the protease and phosphate solubilizing bacteria. CM shows a correlation with variables such as organic carbon, CEC, cellulolytic fungi, nitrogen-fixing bacteria, acid and alkaline phosphatase, and  $\beta$ -glucosidase.



**Figure 5.** Principal component analysis of the three coverings (CP, CM, and CC)

Finally, there is a higher correlation for CC among variables such as gravimetric moisture, pH, phosphorus, nitrogen, microorganisms, phosphate solubilizing fungi, and cellulolytic carbon bacteria, as well as for enzymes such as urease.

Component 1 has a variance of 9.6 and groups 60% of the variation, and, together with component 2 of variance 6.4, which groups 40% of the variation, they represent 100% of the total variation.

## DISCUSSION

This research focused on evaluating whether the application of EA techniques generates significant

changes in soil quality indicators in coffee plantations with different covering crops (CP, CM, and CC). It was found that variables such as phosphorus, organic carbon, phosphate solubilizing bacteria, phosphate solubilizing fungi, and soil cellulolytic fungi increased significantly during the months of application of the EA techniques, namely, vermicomposting, liquid humus, biofertilizer, EM, green manures, strengthening of polycultures, and composted poultry manure.

Said applications of EA techniques, together with agroforestry systems, integrate practices in which a woody component (tree or shrub) is combined with an agricultural one, thus allowing an improvement in the soils with respect to the



production per unit area. In other words, it enhances productivity, thus obtaining more than a single product from the same soil unit (Henao, 2020) and promoting polyculture which is one of the practices of applied EA techniques.

The increase in phosphorus may be due to the enrichment of organic compounds from biofertilizers, which can improve phosphorus dynamics, resulting in increased nutrient availability (Rosatto *et al.*, 2014).

In contrast, the increase in soil organic carbon may be due to the application of green manure and humus techniques, since they are carbon-rich, which allows a greater biointensity of the soil (Martínez *et al.*, 2008). Likewise, this increase is linked to an important component such as humus, which can represent up to 90% of the total carbon in the soil (Jaramillo, 2011), meaning that adding organic matter to the soil makes the incorporation of vermicompost stand out due to its high stability, high content of bacterial fiber, and high content of nutrients that can be assimilated by plants (Salinas-Vásquez *et al.*, 2014).

Furthermore, the use of EA techniques promotes the processes of some microorganisms that can synthesize organic acids, releasing phosphate ions from the exchange surface, thus increasing the concentration of these ions in the soil solution and therefore increasing their availability (Tapia & García, 2013). Additionally, the organic amendments used could cause an increase in soil phosphorus due to their derived composition (water, legumes, yeast, cow, and rabbit manure), given that they are associated with an increase in organic matter, which stores soil nutrients that improve its structure, as well as with the concentration of phosphorus in the soil, as plant roots absorb phosphorus (Múnera, 2014). Regarding biological indicators, the results obtained showed statistical increases in phosphate solubilizing bacteria and fungi, as well as in cellulolytic fungi. These results coincide with those found by other studies that

evaluated the effect of the application of mycorrhizae in coffee growing systems (Avila *et al.*, 2020).

Many soil microorganisms can transform insoluble phosphorus into forms that can be assimilated by plants, such as phosphate solubilizing bacteria. The increase in such bacteria may be related to the ionic forms of Pi (primary soil minerals) such as the  $H_2PO_4^-$  ion, which can be absorbed by plants due to its solubility in water. These are dependent on pH, which ranges between 4.0 and 6.0 (Restrepo *et al.*, 2015). Considering that the pH of this study was between 5.1 and 5.6, carrying out these processes is considered feasible. Likewise, this is correlated with the increase in inorganic phosphorus in the soil, which may be associated with a greater number of colony-forming units of phosphate solubilizing microorganisms as the application of EA techniques for the purposes of this study progressed.

As for phosphate solubilizing fungi, a significant increase was evidenced before the application of the EA techniques, mainly with the biofertilizer, which yielded positive responses for crops (Patiño & Sanclemente, 2014). These microorganisms transform insoluble mineral compounds into soluble minerals that are absorbed by plants (phosphorus solubilization) (Alejo-Iturvide *et al.*, 2016).

Additionally, we observed a significant increase in cellulolytic fungi, possibly because of the increase in organic matter related to the application of the EA techniques, which promote an increase in cellulolytic microorganisms, and the presence of cellulose as a source for carbon, since this is the major component of plant biomass found in organic matter (Monserrate *et al.*, 2014). These results match those found by other authors when comparing organic farming systems in coffee with conventional ones (Garzón *et al.*, 2020). Additionally, efficient microorganisms (EM) secrete beneficial substances such as vitamins, organic acids, antioxidants, among others. These antioxidants promote the decomposition of organic matter and

increase the content of humus in the soil (Liriano *et al.*, 2015).

As for soil enzymatic activities, in general, it can be observed that there was no significant increase related to the application of EA techniques. In the case of acid and alkaline phosphatase, the absence of significant changes during the development of this research may be due to the fact that a high P content can inhibit the action mechanism of the enzymes by having a greater availability of nutrients in the soil in labile form (Narváez *et al.*, 2010). The  $\beta$ -glucosidase enzyme, in turn, is one of the most abundant and important enzymes for soil quality. However, no significant change was found, which may be due to the fact that, in order to demonstrate its changes, longer times are required for the application of EA techniques (Gutiérrez *et al.*, 2008).

On the other hand, regarding the covering crops that accompany the coffee crop (CP, CM, and CC), and as it can be observed in Figure 5 for ACP, the nitrogen-fixing bacteria, acid phosphatase, alkaline phosphatase, and  $\beta$ -glucosidase increased for CP. For CC, the pH, phosphorus, nitrogen, phosphate solubilizing fungi, cellulolytic bacteria, and urease also increased. The same behavior was observed for organic carbon, cellulolytic fungi, and acid phosphatase with both CC and CM. This has to do with the relationships between the increase in organic matter and the application of techniques such as vermicomposts, biofertilizers, efficient microorganisms, and green manures. This coincides with reports that soil coverings contribute to the stimulation and optimization of soil biological processes, improving soil fertility, counteracting erosion processes, and favoring the presence of populations of beneficial organisms (Puertas *et al.*, 2008).

Moreover, it can be seen in Figure 4 (PCA) that there is a direct correlation for months 8 and 10 with nine of the variables that were analyzed, namely phosphorus, organic carbon, nitrogen, cellulolytic fungi, nitrogen-fixing bacteria, phosphate solubilizing fungi, and  $\beta$ -glucosidase, which are variables

that increased due to the application of EA techniques because they generated a high content of organic matter and high biological activity in soils, thus highlighting the importance of applying these methods over time (Gutiérrez *et al.*, 2008).

## CONCLUSIONS

According to the univariate data analysis of the six variables evaluated on physicochemical properties, a significant increase in the phosphorus and organic carbon was reported in the coffee soils under study. It was also observed that, due to the application of the EA techniques, the five functional groups of quantified microorganisms showed a significant increase in the abundance of phosphate solubilizing bacteria and fungi, as well as cellulolytic fungi.

As for the multivariate data analysis, the PCA determined that, during months 8 and 10 of application of the EA techniques, there was a significant increase in the content of phosphorus, organic carbon, nitrogen, the abundance of cellulolytic fungi, nitrogen-fixing bacteria, phosphate solubilizing fungi, and  $\beta$ -glucosidase.

## ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank Mrs. Angelica Rivera and Mr. Flaminio Gomez for allowing us to conduct this study in their coffee plantations. We also acknowledge all those who enabled the execution of the project in the area.

## CONTRIBUTIONS BY AUTHOR

L.M.A.T. planned the main elements of this research, as well as the general methodological strategy. P.D.G.P., L.K.A.V., and LMAT participated in the field process. P.D.G.P. and L.K.A.V. performed the sample collection and laboratory analysis process.

The three authors wrote and revised this text together. L.M.A.T. secured the funds to carry out the investigation.

## REFERENCES

- Alcaldía Municipal San José de Pare Boyacá (2020). *Municipio San José de Pare*.  
<https://www.sanjosedepare-boyaca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Alejo-Iturvide, F., Márquez-Lucio, M. A., González-López, C. I., & de la Rivadela, G. A. (2016). Biosolubilizadores de fósforo orgánico e inorgánico del bosque templado de Santa Rosa Guanajuato, México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(3), 10-17.  
[https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias\\_Ambientales\\_y\\_Recursos\\_Naturales/vol-2num3/Revista\\_de\\_Ciencias\\_Ambientales\\_y\\_Recursos\\_Naturales\\_V2\\_N3\\_2.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol-2num3/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N3_2.pdf)
- Avellaneda-Torres, L. A., Guevara-Pulido, C. P., & Torres-Rojas, E. (2014). Assessment of cellulolytic microorganisms in soils of nevados Park, Colombia. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(4), 1211-1220.  
<https://doi.org/10.1590/S1517-83822014000400011>
- Avellaneda-Torres, L. A., León-Sicard, T. E., & Torres-Rojas, E. (2018). Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of neotropical high Andean Páramo ecosystems soils. *Science of the Total Environment*, 631-632, 1600-1610.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.137>
- Avellaneda-Torres, L., León-Sicard, T., Guerra-Castro, E., & Torres-Rojas, E. (2020). Potato cultivation and livestock effects on microorganism functional groups in soils from the neotropical high Andean Páramo. *Revista Brasileira de Ciência di Solo*, 44, 1-25.  
<https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20190122>
- Ávila-Bayona, C. P., Álvarez-Cano, M. A., & Avellaneda-Torres, L. M. (2020). Soil Quality Indicators Associated With The Application Of Mycorrhizal Fungi In Coffee Plantations. *Revista Ingeniería Solidaria*, 44(3), 1-26  
<https://doi.org/10.16925/2357-6014.2020.03.05>
- Bautista, A., Etchevers, J., del Castillo, R., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio ambiente*, 13(2), 90-97.  
<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=149>
- Bernal, F. & Forero, U. (2014). Evaluación de especies vegetales para el manejo de la acidez en suelos sulfatados ácidos de Paipa, Boyacá. *Corpoica ciencias tecnológicas agropecuarias*, 15(2), 229-236.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol15\\_num2\\_art:362](https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:362)
- Caballero-Vanegas, J. J., Mejía-Zambrano, K. B., & Avellaneda-Torres, L. M. (2018). Effect of ecological and conventional managements on soil enzymatic activities in coffee agroecosystems. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 48(4), 420-428.  
<https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4852373>
- Callisaya, Y. & Fernández, C. (2017). Evaluación del efecto que tienen los microorganismos eficientes (EM), en el cultivo de pepinillo (*Cucumis sativus* L.), municipio de Achocalla. *APTHAPI*, 3(3), 652-666.  
<http://ojs.agro.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/161>
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., & Solorio-Sánchez, J. (2011). Los sistemas agroforestales como alternativa a la captura de carbono en el trópico mexicano. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(1), 133-143.  
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.047>
- CONABIO (2015). *Bosque, selvas y cafés de Chiapas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad, México*.  
[https://www.biodiversidad.gob.mx/corredor/cbmm/pdf/bosques\\_selvas\\_cafes\\_chiapas.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/corredor/cbmm/pdf/bosques_selvas_cafes_chiapas.pdf)
- Ceccon, E. (2008). La revolución verde: tragedia en dos actos. *Ciencias*, 1(91), 21-29.  
<https://www.redalyc.org/pdf/644/64411463004.pdf>
- de los Ríos, I., Becerril, H., & Rivera, M. (2016). La agricultura ecológica y su influencia en la

- prosperidad rural: visión desde una sociedad agraria (Murcia, España). *Agrociencia*, 50(3), 375-389. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952016000300375&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000300375&lng=es&tlng=es).
- Doran, J. & Parkin, T. (1994). Biochemical fractionation of soil organic matter after incorporation of organic residues. *Open Journal of Soil Science*, 5(6), 135-143.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) (2012). *Comportamiento de la industria Cafetera Colombiana 2012*. [https://federaciondefcafeteros.org/static/files/Informe\\_Industrial\\_Completo2012.pdf](https://federaciondefcafeteros.org/static/files/Informe_Industrial_Completo2012.pdf)
- Fonseca-López, D., Bohórquez-Masmela, I. A., Rodríguez-Molano, C. E., & Vivas-Quilla, N. J. (2020). Efecto del periodo de recuperación en la producción y calidad nutricional de algunas especies forrajeras. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 18(2), 135-145. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(18\)135-144](https://doi.org/10.18684/BSAA(18)135-144)
- García, J. & Ballesteros, M. (2006). Evaluación de los parámetros de calidad para la determinación de fósforo disponible en suelos. *Revista Colombiana de Química*, 35(1), 81-89. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=309026667006>
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942012000200001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001)
- Garzón, A. F., Perdomo-Rivas, L. P., and Avellaneda-Torres, L. M. (2020). Effect of management (ecological and conventional) on functional groups of soil microorganisms in coffee agroecosystems with different resilience to climate variability, Colombia. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 42(1), e48620. <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v42i1.48620>
- Geissert, D., Mólgora, A., Negrete, S., & Hunter, R. (2017). Efecto del manejo de la cobertura vegetal sobre la erosión hídrica en cafetales de sombra. *Agrociencia*, 51(2), 119-133. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952017000200119&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000200119&lng=es&tlng=es)
- González, A., Rivera, M., Ortiz, C., Almaraz, J., Trujillo, A., & Cruz, G. (2013). Uso de fertilizantes orgánicos para la mejora de propiedades químicas y microbiológicas del suelo y del crecimiento del cítrico Citrange troyer. *Universidad y ciencia*, 29(2), 123-139. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792013000200003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792013000200003)
- Guiberteau, A. & Labrador, J. (1991). *Técnicas de Cultivo en Agricultura Ecológica*. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación Secretaría General de Estructuras Agrarias.
- Gutiérrez, J., Aguilera, L., & González, C. (2008). Agroecología y sustentabilidad. *Convergencia*, 15(46), 51-87. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1405-14352008000100004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-14352008000100004&lng=es&nrm=iso)
- Gutiérrez, V., Pinzón, A., Cassas, J., & Mercedes, M. (2008). Determinación de la actividad celulolítica del suelo proveniente de cultivos de *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Agronomía Colombiana*, 26(3), 497-504. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/12014/12639>
- Henao, E. (2020). *Los sistemas agroforestales expuestos como sistemas sostenibles de producción en Colombia (Trabajo de grado, Ingeniería Agroforestal)*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- IDEAM (1994). Medición de la humedad del suelo. In IDEAM (Eds.). *Guía de prácticas hidrológicas* (195-206). IDEAM. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/012406/Cap15.pdf>
- Jarquín, A., Salgado, S., Palma, D., Camacho, W., & Guerrero, A. (2011). Análisis de nitrógeno total en suelos tropicales por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) y quimiometría. *Agrociencia*, 45(6), 653-662. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952011000600001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000600001)

- Jaramillo, D. (2011). Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia). *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 35(134), 23-33.
- Kassambara, A. & Mundt, F. (2020). *Factoextra: Extract and visualize the results of multivariate data analyses. R package version 1.0.7.*  
<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Liriano, R., Núñez, D., Hernandez, L., & Castro, A. (2015). Evaluación de microorganismos eficientes y *Trichoderma harzianum* en la producción de posturas de cebolla (*Allium cepa* L). *Centro agrícola*, 42(2), 25-32.  
<http://oaji.net/articles/2016/2674-1454357776.pdf>
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. H. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>
- Milanés, M., Rodríguez, H., Ramos, R., & Rivera, M. (2005). Efectos del compost vegetal y humus de lombriz en la producción sostenible de capítulos florales en *Calendula officinalis* L y *Matricaria recutita* L. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 10(1).  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1028-47962005000100008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962005000100008)
- Monserate, A., Zambrano, D., Rondón, A., Laurencio, M., Pérez, Q., León, R., & Rivera, R. (2014). Aislamiento, selección y caracterización de hongos celulolíticos a partir de muestras de suelo en Manabí-Ecuador. *Revista de facultad de ciencias agrarias*, 46(2), 177-189.  
<https://www.redalyc.org/pdf/3828/382837658004.pdf>
- Múnera, G. (2014). El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. *Universidad Tecnológica de Pereira*.  
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5248/el%20fosforo%20elemento.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Narváez, M., Sánchez M., & Menjivar, J. (2010). Cambios en las Propiedades Químicas y en la Actividad de las Fosfatasa en Suelos Cultivados con Maíz Dulce (*Zea mays* L) Fertilizados con Vinaza. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(2), 5533-5541.  
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/25042>
- Patíño, C. & Sanclemente, O. (2014). Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF): una alternativa biotecnológica para una agricultura sostenible. *Entramado*, 10(2), 288-297.  
<https://www.redalyc.org/pdf/2654/265433711018.pdf>
- Puertas, F., Arévalo, E., Zúñiga, L., Alegre, J., Loli, O., Soplin, H., & Baligar, V. (2008). Establecimiento de cultivos de cobertura y extracción total de nutrientes en un suelo de trópicos húmedo en la Amazonía Peruana. *Ecología aplicada*, 7(1,2), 23-28.  
<https://doi.org/10.21704/rea.v7i1-2.356>
- R Core Team (2019). *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Rennie, R. (1981). A single medium for the isolation of acetylene-reducing (dinitrogen-fixing) bacteria from soils. *Canadian Journal of Microbiology*, 27(8), 8-14.  
<https://doi.org/10.1139/m81-002>
- Restrepo, G., Marulanda, S., de la Fe, Y., Díaz, A., Lucía, V., & Hernández, A. (2015). Bacterias solubilizadoras de fosfato y sus potencialidades de uso en la promoción del crecimiento de cultivos de importancia económica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 46(1), 63-76.  
<https://www.redalyc.org/pdf/1812/181238817006.pdf>
- Rosatto, L., de Mello, R., Castellanos, L., Reyes, A., Caione, G., & Silva, C. (2014). Solubilización de fuentes de fósforo asociadas a un compuesto orgánico enriquecido con biofertilizantes. *Agrociencia*, 48(5), 489-500.  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952014000500003](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952014000500003)
- Rubio-Sánchez, W. R. (2016). *Impactos de la revolución verde en la agricultura colombiana*.  
<https://nutriciongeneral.files.wordpress.com/2016/06/revolucic3b3n-verde.pdf>
- Ruelas-Mojardín, L. C., Nava-Tablada, M. E., Cervantes, J., & Barradas, V. L. (2014). Importancia ambiental

de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y bosques*, 20(3), 27-40.

<https://doi.org/10.21829/myb.2014.203149>

Salinas-Vásquez, F., Sepúlveda-Morales, L., & Sepúlveda-Chavera, G. (2014). Evaluación de la calidad química del humus de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) elaborado a partir de cuatro sustratos orgánicos en Arica. *Idesia (Arica)*, 32(2), 95-99.

<https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200013>

Sundara, R. & Sinha, M. (1963). Phosphate dissolving microorganisms in the soil and rhizosphere. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1(33), 272 – 278.

Tapia, Y. & García, F. (2013). La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el

suelo en ecosistemas oligotróficos. Una revisión crítica. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 231-242.

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792013000400231&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792013000400231&script=sci_abstract)

Trejo-Escareño, H. I., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., & Vázquez-Vázquez C. (2013). Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción de forraje de maíz. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4(5), 727-738.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v4i5.1171>

Vela, G. López, J., & Rodríguez, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, central de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 77, 18-30.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n77/n77a3.pdf>





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Using Inverse Modeling by HYDRUS-1D to Predict Some Soil Hydraulic Parameters from Soil Water Evaporation

### Uso del modelado inverso por HYDRUS-1D para predecir algunos parámetros hidráulicos del suelo a partir de la evaporación del agua del suelo

Esam Mohammed<sup>1\*</sup>, Salahaldeen Abid-Alziz AL-Qassab<sup>2</sup>,  
Faris Akram Salih AL-Wazan<sup>2</sup>

Mohammed, E.M., Qassab, S.A., & Salih, F.A. (2022). Using Inverse Modeling by HYDRUS-1D to Predict Some Soil Hydraulic Parameters from Soil Water Evaporation. *Colombia Forestal*, 25(1), 21-35.

**Recepción:** 22 de junio 2021

**Aprobación:** 8 de octubre 2021

#### Abstract

The objective of this research was to assess the use of unsaturated water flow in terms of soil water evaporation, which was determined by evaluating some soil hydraulic parameters in different soil textures. The results show that the predicted values of these parameters, which were obtained through inverse modeling with the HYDRUS-1D software and depend on the change of the volumetric water content, exhibited a significant agreement with the measured values from laboratory or field simulation data for soil water evaporation at 5, 10, 20, and 45 days of measurement. At the same time, inverse simulation was conducted on soil hydraulic parameters obtained from a 5-day laboratory soil evaporation period to predict field infiltration values and water retention curve, which showed a significant agreement with measured values for all soil textures.

**Keywords:** cumulative infiltration, soil evaporation, soil hydraulic parameters.

#### Abstract

El objetivo de esta investigación fue evaluar el uso de agua insaturada en función de la evaporación del agua del suelo, que fue determinada mediante el examen de algunos parámetros hidráulicos del suelo en diferentes texturas. Los resultados muestran que los valores predichos de estos parámetros, que fueron obtenidos por medio de modelado inverso con el software HYDRUS-1D y dependen del cambio de contenido volumétrico de agua, mostraron estar significativamente de acuerdo con los valores medidos de simulaciones con datos obtenidos en un laboratorio o en campo para la evaporación del agua del suelo a los 5, 10, 20 y 45 días de medición. Simultáneamente se realizó una simulación inversa de un periodo de 5 días de evaporación del suelo en un laboratorio para predecir los valores de infiltración y la curva de retención de agua, los cuales mostraron estar significativamente de acuerdo con los valores medidos de todas las texturas del suelo.

**Palabras clave:** infiltración acumulativa, evaporación del suelo, parámetros hidráulicos del suelo.

<sup>1</sup> Technical Agricultural College, Northern Technical University .Mosul., Iraq.

<sup>2</sup> College of Agriculture and Forestry, Mosul University. Mosul, Iraq.

\* Corresponding author: [esamalkaisy@ntu.edu.iq](mailto:esamalkaisy@ntu.edu.iq)

## INTRODUCTION

The agricultural applications of HYDRUS include irrigation, drainage design, salinization of irrigated lands, pesticide leaching and volatilization, virus movement in the soil subsurface, and the analysis of riparian systems. Typical non-agricultural problems include the design of radioactive waste disposal sites, contaminant leaching from landfills, design and analysis of capillary barriers, transport and degradation of chlorinated hydrocarbons, and recharging from deep vadose zones. Any of these applications, in principle, may involve the estimation of soil hydraulic parameters.

An effective system for measuring the hydraulic parameters is needed when they are used in predicting parameters for modeling the ecosystem and the movement of the groundwater. This is why such a system needs to contribute to these parameters when using modern irrigation techniques and different methods of fertilization. Mathematical models of the movement of water and salts are important tools for analysis and understanding. However, using models is not easy, especially with the huge number of parameters that must be known before implementing them to fulfill their purpose. The success of forecasting and achieving high correlation depends on similar and identical parameters that appear clearly during the modeling process (Minasny & McBratney, 2002). Estimating hydraulic parameters requires great effort and work, and it takes a long time, be it by measurement in a laboratory or in the field. To overcome this problem, indirect methods have been used to predict soil hydraulic parameters, the most prominent being inverse modeling, which has yielded good results (Simunek et al., 1998a and Hopmans et al., 2002). Inverse modeling is one of the methods to predict many of these parameters through measurements of the water movement in the soil. With this information, functions can be predicted with high accuracy and flexibility. This method is

a modern scientific technique based on secondary easy-to-measure characteristics associated with the parameters under study. It is more flexible than other methods, it is relatively simple to implement, and it can be assimilated to all experimental conditions (Hopmans et al., 2002). Inverse modeling has been characterized as an effective method for estimating soil hydraulic parameters, which is evidenced by a series of repeated measurements of soil moisture content during converged periods, where soil water movement models are linked with the best appropriate algorithm (Levenberg-Marquardt) in order to find the best set of constants to reduce error. It is an advanced method suitable for any range of sites, and it can accommodate differences in conditions such as the number of variables and the surrounding conditions, as well as being an innovative method that addresses the sensitivity of numerical solutions (Ritter et al., 2003; Simunek & van Genuchten, 2008).

Samani and Fatah (2009) and Simunek et al. (2011) used inverse modeling to find values for soil hydraulic parameters and stated that estimating these parameters in this way could result in a high degree of accuracy to predict the water movement and the heterogeneity of the groundwater level. The most important aspect of inverse modeling is its ability to analyze all changes in the porous system of the soil, as well as to give accurate predictions while having a high flexibility towards the data that is used. This method is considered to be the best simulating model because it is very sensitive when comparing the real measured parameter values with the predictions made (Simunek et al., 2012). Soil hydraulic parameters can also be obtained by means of inverse modeling procedures in HYDRUS-1D using simple water diffusion in soil columns. The derived parameters are capable of accurately describing water movement over extended periods of time, as well as alternative flow through the scenarios to which they were fitted (Kirkham et al., 2019).



Hachimi *et al.* (2019) used a direct and inverse method on the values obtained from the field measurements of cumulative infiltration and water contents to obtain soil hydraulic parameters. The results of their study showed a high correlation between the simulated and measured values, and they stated that that HYDRUS is highly efficient at predicting soil hydraulic parameters. Fujimaki and Yanagawa (2019) used the evaporation data from two tension meters to inversely determine water retention and hydraulic conductivity functions in a relatively low-cost and fast laboratory method for different soil textures. Amini *et al.* (2019) concluded that using the inverse procedure to determine soil hydraulic properties constituted a relatively simple and rapid reliable alternative method to estimate both soil water retention and hydraulic conductivity curves. Guellouz *et al.* (2020) used infiltration flow, soil water contents, and pressure heads, which were measured during ponded infiltration and internal drainage tests, as input data for the inverse problems. They also estimated unsaturated soil hydraulic parameters to predict water dynamic transport through a vertical soil profile under the effects of irrigation, drainage, and evapotranspiration, which is imperative for managing soils in arid regions.

The aim of this research is to use the inverse modeling of the HYDRUS-1D software to obtain the values of soil hydraulic parameters through water movement during evaporation in heterogeneous soils. This is carried out by determining the optimal evaporation time for optimal estimation processes, as well as by reducing the HYDRUS-1D software to the lowest possible period for calculation. The inverse model of estimated values for soil hydraulic properties can be validated as follows: (i) by comparing simulated cumulative infiltration with field data and (ii) with the degree of agreement between the water retention curves, which were computed from inverse simulated data, and the laboratory-measured data.

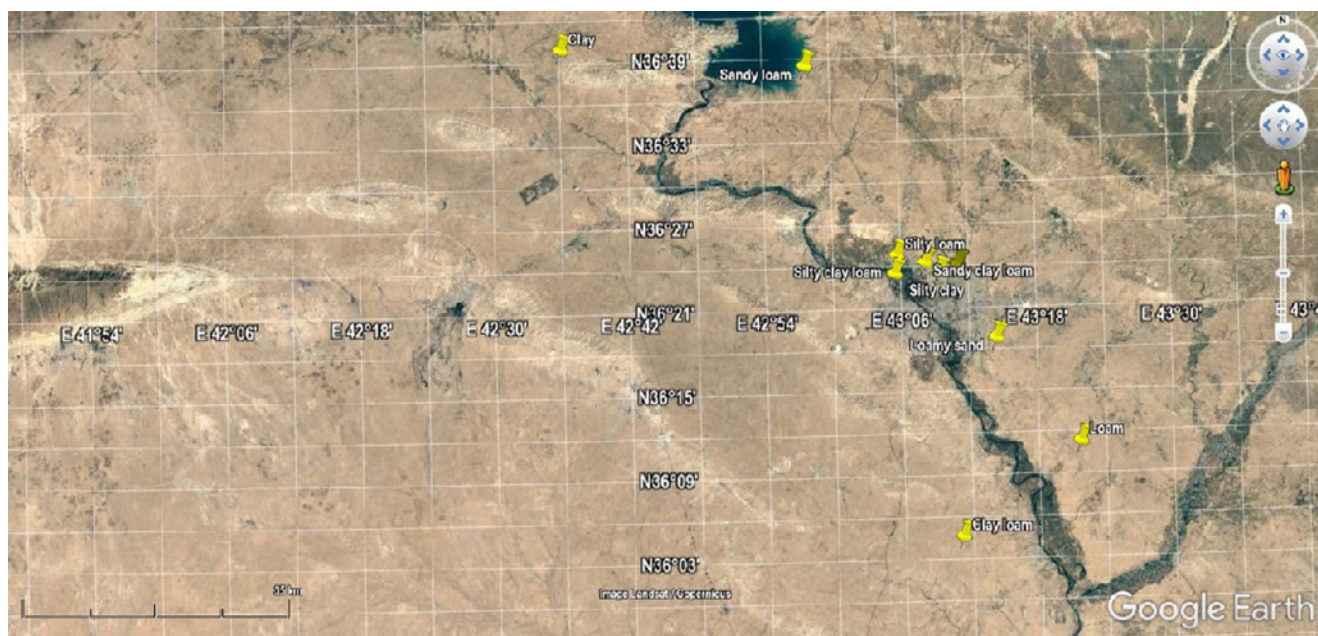
## MATERIALS AND METHODS

### Field and laboratory experiments

Ten surface samples, taken from 0-30 cm depths and with different textures ranging from sandy loam to clay (Figure 1, Table 1), were collected from different areas in the Nineveh Governorate in Iraq, 223 m above the sea level under semi-arid climate. Some physical properties of the soil were measured according to Klute (1986), as shown in Table 1. A pressure plate device (a Model 1500 pressure extractor from Soilmoisture Equipment Corp., CA, USA) was used to determine the characteristic tension curve under following pressures: 33. 100. 300. 500. 700. 900. 1100. and 1500 Kpa. The Mulaem-van Genuchten (MVG) equation was used, and its  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$  parameters were fitted from the water retention curve using Microsoft Excel and the nonlinear optimization technique. The soil bulk density was measured by means of cores with a 5 cm diameter and a 5 cm height.

Inverse modeling was carried out using the HYDRUS-1D software package (Simunek *et al.*, 2013) to predict the soil hydraulic parameter values of  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$ , which were obtained from the change in moisture content values of soil water evaporation in a micro-lysimeter at laboratory temperature (a 25.4 cm diameter and 40 cm long cylinder filled with soils of different textures). Soil water evaporation was measured through the soil samples taken by a micro auger from the following depths: 0-5. 5-10. 10-15-, 15-50. and 20-30 cm. A plot of 2x2 m was used for measuring evaporation in the field at each of the four sites. The aforementioned soil samples were taken at the following times: 5. 10. 20. and 45 days. Simulation processes were carried out by feeding the program data according to the changing values of the soil moisture content.

Double rings with diameters of 0.3 and 0.6 m were used for measuring the water infiltration rate.



**Figure 1.** Map of the Nineveh Governorate in Iraq (36° 34' N, 43° 13' E) and the soil sample locations

**Table 1.** Some soil physical properties under study

Texture	Order	Initial volumetric water content cm.cm <sup>-3</sup>	Bulk density Mg.m <sup>-3</sup>	Total porosity cm.cm <sup>-1</sup>	Soil particle fractions %		
					sand	silt	clay
Loamy sand	ARIDISOLS	0.133	1.35	0.491	53	29	<b>18</b>
Sandy loam	ENTISOLS	0.065	1.559	0.412	80	10.3	<b>8.7</b>
Loam	ENTISOLS	0.146	1.37	0.483	30	45	<b>25</b>
Silty loam	ENTISOLS	0.185	1.33	0.499	24.3	52.3	<b>23.4</b>
Clay loam	ENTISOLS	0.19	1.389	0.476	24.5	47	<b>28.5</b>
Sandy clay loam	ENTISOLS	0.14	1.373	0.482	54	25	<b>21</b>
Silty clay loam	ENTISOLS	0.189	0.317	0.503	11	52	<b>37</b>
Sandy clay	ARIDISOLS	0.201	0.301	0.51	3.8	47.4	<b>48.8</b>
Silty clay	ARIDISOLS	0.195	0.344	0.493	7.5	47.5	<b>45</b>
Clay	ARIDISOLS	<b>0.222</b>	<b>0.205</b>	<b>0.546</b>	5	37.5	57.5

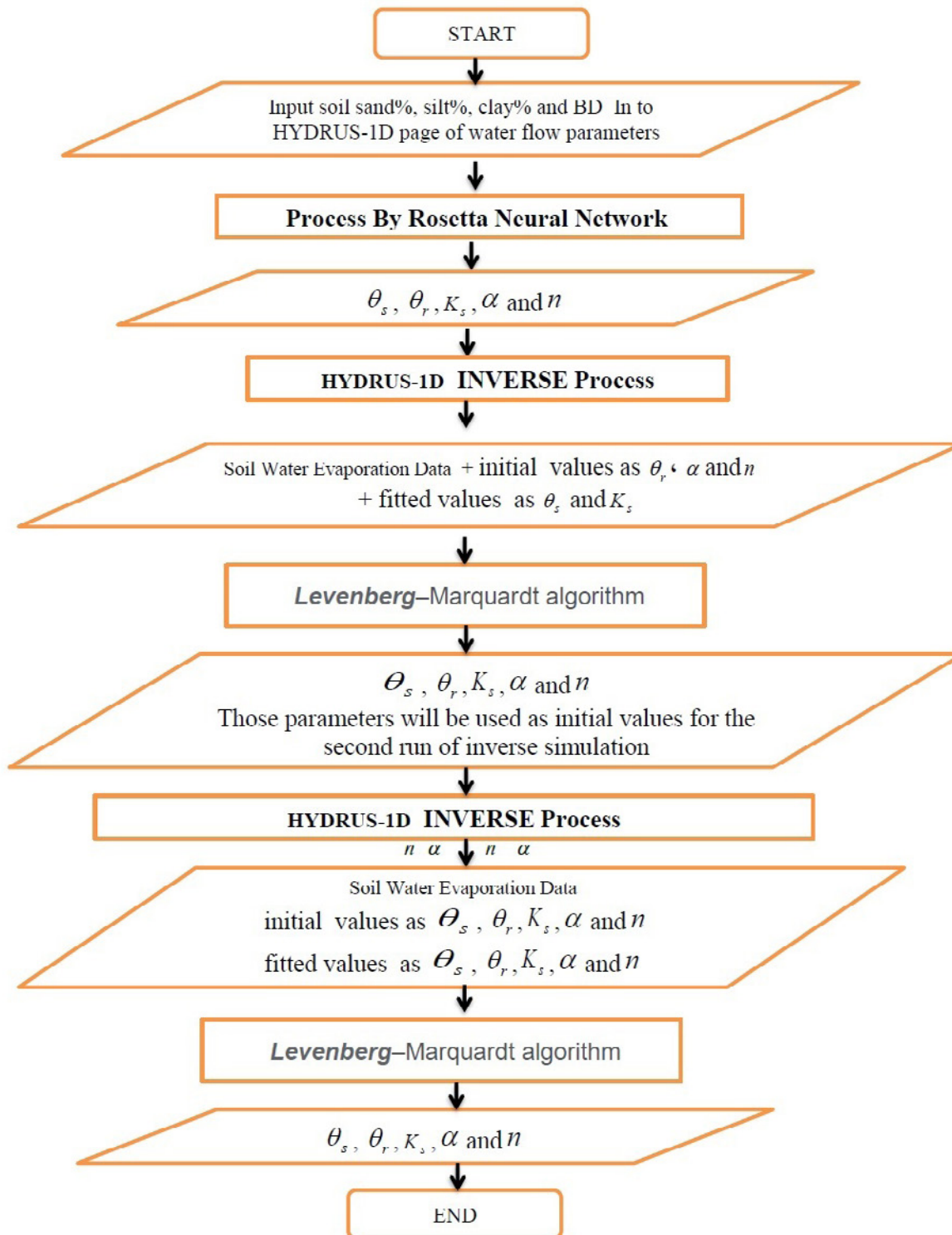


Figure. 2. Flowchart of the special technique program

## Soil hydraulic parameters

In this study, the MVG model (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976) were used for the soil hydraulic functions, as shown in Equations (1) to (4).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_m - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad (1)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1.0 < m \quad (2)$$

$$K(S_e) = K_0 S_e^L [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (3)$$

$$S_e^* = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \quad (4)$$

where  $\theta$  is the volumetric water content ( $L^3L^{-3}$ ),  $K(h)$  is the hydraulic conductivity ( $LT^{-1}$ ),  $\theta_r$  and  $\theta_s$  the residual and saturated water content,  $K_s$  is the saturated hydraulic conductivity ( $LT^{-1}$ ),  $h$  is the soil water matric pressure head (L),  $\alpha$  is the inverse of the bubbling pressure ( $1/L$ ),  $n$  is the pore size distribution index,  $l$  is the pore connectivity parameter,  $m$  is the shape parameter of soil water characteristic, and  $S_e$  is the effective saturation. The value of parameter  $l$  was considered to be 0.5. resulting from average conditions in a range of soils.

The  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$  parameters of the MVG model were fitted by the Excel Solver using a nonlinear optimization technique to minimize the sum of square error (SSE) between the measured and predicted values of soil water contents at  $h = 33$ , 100, 300, 500, 700, 900, 1100, and 1500 Kpa. The soil water retention curve,  $\theta(h)$ , was determined using the fitted MVG parameters ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$ ).

## Theoretical background for inverse modeling

Hydraulic parameters of soil could be indirectly estimated from transient flow and/or transport using a parameter optimization approach. Minimizing the difference between the observed values and the predicted response of the system, which is known as the objective function, is typically the basis of inverse methods.

The numerical solution of the flow equation, the initial and boundary conditions, and some transport parameters and parameterized hydraulic functions all represent the system response. The Levenberg-Marquardt algorithm is used to improve the optimized system parameters, estimated initially by iteratively reducing the errors to achieve the objective function.

The data column outflow generated in the laboratory and the steady state water flow field transport data are obtained by applying this methodology. Simunek and van Genuchten (1999) and Simunek et al. (2013) are the references for conducting this methodology.

## Special technique program

Many steps were performed on the HYDRUS -1D software to achieve inverse modeling and reduce the implementation time to the minimum period possible (1 to 5 seconds only). However, traditional methods can take many hours. This technique has been used successfully to obtain our results, as explained by the flowchart in Figure. 2.

## RESULTS

The measured and predicted values of the soil hydraulic parameters are shown in Table 2. These results showed a good agreement between the predicted and measured values. Nevertheless, it was noticed that all soil hydraulic parameters reported a low agreement between the measured and predicted values as the percentage of clay increased. The difference in the results was about 20%.

The predicted and measured saturated hydraulic conductivity values ( $K_s$ ) during all the periods of evaporation measurement were in very good agreement, especially at 20 and 45 days, thus resulting in a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.9998 and root mean square error (RMSE) values ranging from 0.341 to 0.6290, as shown in Table 3.

**Table 2.** Values of the soil hydraulic parameters for  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$ , measured and predicted using inverse modeling under field conditions at 5, 10, 20 and 45 days

Texture	5 days									
	$K_s$ cm .day -1		$n$		$\alpha$		$\theta_r$		$\theta_s$	
	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me
Sandy clay loam	8,20	8,35	0.363	0.363	0.013	0.013	0.138	0.138	0.44	0.44
Clay loam	3.48	3.51	0.292	0.305	0.04	0.056	0.185	0.186	0.51	0.56
Silty loam	5.06	5.04	0.316	0.324	0.013	0.024	0.169	0.179	0.45	0.48
Clay	2.10	2.01	0.278	0.283	0.042	0.042	0.2	0.2	0.591	0.59
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.9997</b>		<b>0.98558</b>		<b>0.84117</b>		<b>0.97424</b>		<b>0.86309</b>	
<b>RMSE</b>	<b>0.0890</b>		<b>0.0131</b>		<b>0.01355</b>		<b>0.0051</b>		<b>0.041</b>	
	10 days									
Sandy clay loam	8,13	8.35	0.356	0.363	0.01	0.013	0.113	0.138	0.443	0.44
Clay loam	3.31	3.51	0.301	0.305	0.04	0.056	0.186	0.186	0.564	0.56
Silty loam	4.88	5.04	0.311	0.324	0.01	0.024	0.161	0.179	0.45	0.48
Clay	0.90	2.01	0.277	0.283	0.04	0.042	0.2	0.2	0.522	0.59
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.9999</b>		<b>0.9873</b>		<b>0.83797</b>		<b>0.97004</b>		<b>0.78059</b>	
<b>RMSE</b>	<b>0.1800</b>		<b>0.0153</b>		<b>0.01385</b>		<b>0.020</b>		<b>0.0495</b>	
	20 days									
Sandy clay loam	8,05	8,35	0.36	0.363	0.01	0.013	0.138	0.138	0.443	0.44
Clay loam	3.3	3.51	0.302	0.305	0.06	0.056	0.186	0.186	0.564	0.56
Silty loam	4.75	5.04	0.322	0.324	0.02	0.024	0.179	0.179	0.48	0.48
Clay	0.83	2.01	0.281	0.283	0.04	0.042	0.196	0.2	0.591	0.59
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.9999</b>		<b>0.999785</b>		<b>0.99999</b>		<b>0.996106</b>		<b>0.99999</b>	
<b>RMSE</b>	<b>0.2526</b>		<b>0.005</b>		<b>0.0004</b>		<b>0.002</b>		<b>0.000012</b>	
	45 days									
Sandy clay loam	7,96	8,35	0.339	0.363	0.04	0.013	0.113	0.138	0.444	0.44
Clay loam	2.90	3.51	0.303	0.305	0.042	0.0564	0.186	0.186	0.521	0.564
Silty loam	4.10	5.04	0.323	0.324	0.013	0.024	0.179	0.179	0.48	0.48
Clay	2.11	2.01	0.282	0.283	0.013	0.042	0.2	0.2	0.54	0.59
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.9753</b>		<b>0.948625</b>		<b>0.83984</b>		<b>0.984907</b>		<b>0.974801</b>	
<b>RMSE</b>	<b>0.5962</b>		<b>0.014</b>		<b>0.0137</b>		<b>0.0125</b>		<b>0.0465</b>	

Pr=predicted Me=Measured

The deviation percentage between the measured and predicted values of  $K_s$  did not exceed 6% for all soil textures.

The laboratory measurements also showed a good agreement between the measured and the predicted values of hydraulic parameters when using inverse modeling by means of HYDEUS-1D, which is also the case for field measurements.

Table 4 showed a high correlation between  $\theta_r$  and  $K_s$ ,  $n$  and  $\theta_s$ , and  $n$  and  $(\theta_s, \theta_r)$ , as shown in the bold entries of Table 5. implying a significance level of 0.05. This Table also evidences a good correlation between  $\theta_r$ ,  $n$ , and  $K_s$  and each of the silt%, sand%, and soil bulk density.

**Table 3.** Values of the soil hydraulic parameters for  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$ , measured and predicted using inverse modeling under laboratory conditions at 5, 10, 20 and 45 days

5 days										
Texture	$K_s$ cm .day <sup>-1</sup>		$n$		$\alpha$		$\theta_r$		$\theta_s$	
	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me
Clay	2.48	2.56	0.260	0.267	0.0740	0.0865	0.219	0.219	0.64	0.640
Silty clay	0.45	0.53	0.302	0.302	0.0311	0.0333	0.188	0.188	0.52	0.556
Sandy clay	0.41	0.46	0.282	0.284	0.0489	0.0618	0.19	0.19	0.579	0.576
Silty clay loam	0.66	0.72	0.318	0.327	0.0310	0.0317	0.178	0.178	0.555	0.555
Sandy clay loam	7.91	8.35	0.363	0.363	0.0133	0.0133	0.119	0.138	0.444	0.443
Clay loam	3.61	3.51	0.300	0.305	0.0400	0.0564	0.186	0.186	0.526	0.564
Silty loam	4.88	5.04	0.320	0.324	0.0138	0.0242	0.179	0.179	0.430	0.480
Loam	6.22	6.57	0.301	0.302	0.0501	0.0710	0.131	0.131	0.410	0.430
Sandy loam	17.24	20.36	0.371	0.399	0.0122	0.0122	0.120	0.129	0.428	0.425
Loamy sand	80.11	89.12	0.356	0.434	0.0517	0.0705	0.057	0.056	0.421	0.428
R <sup>2</sup>	<b>0.9996</b>		<b>0.85459</b>		<b>0.9346</b>		<b>0.9844</b>		<b>0.9412</b>	
RMSE	<b>2.7249</b>		<b>0.04191</b>		<b>0.026342</b>		<b>0.008140</b>		<b>0.043418</b>	
10 days										
Texture	$K_s$ cm .day <sup>-1</sup>		$n$		$\alpha$		$\theta_r$		$\theta_s$	
	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me
Clay	0.91	2.56	0.301	0.305	0.0645	0.0865	0.219	0.219	0.64	0.64
Silty clay	0.41	0.53	0.3	0.283	0.0311	0.0333	0.188	0.188	0.48	0.556
Sandy clay	0.40	0.46	0.363	0.363	0.0498	0.0618	0.190	0.190	0.57	0.576
Silty clay loam	0.54	0.72	0.317	0.324	0.031	0.0317	0.178	0.178	0.555	0.555
Sandy clay loam	7.70	8.35	0.327	0.327	0.0133	0.0133	0.120	0.138	0.444	0.443
Clay loam	3.62	3.51	0.282	0.284	0.0564	0.0564	0.161	0.186	0.51	0.564
Silty loam	4.44	5.04	0.371	0.399	0.0138	0.0242	0.179	0.179	0.42	0.48
Loam	5.91	6.57	0.3	0.302	0.0467	0.071	0.131	0.131	0.43	0.43
Sandy loam	15.22	20.36	0.356	0.434	0.0517	0.0705	0.057	0.056	0.428	0.428
Loamy sand	78.22	89.12	0.267	0.267	0.0122	0.0122	0.120	0.129	0.428	0.425
R <sup>2</sup>	<b>0.9986</b>		<b>0.8400</b>		<b>0.8934</b>		<b>0.9630</b>		<b>0.8100</b>	
RMSE	<b>3.8328</b>		<b>0.04635</b>		<b>0.02775</b>		<b>0.018392</b>		<b>0.080504</b>	
20 days										
Texture	$K_s$ cm .day <sup>-1</sup>		$n$		$\alpha$		$\theta_r$		$\theta_s$	
	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me
Clay	0.81	2.56	0.266	0.267	0.074	0.0865	0.219	0.219	0.64	0.64
Silty clay	0.39	0.53	0.302	0.302	0.0311	0.0333	0.188	0.188	0.556	0.556
Sandy clay	0.34	0.46	0.282	0.284	0.0508	0.0618	0.190	0.190	0.576	0.576
Silty clay loam	0.46	0.72	0.311	0.327	0.031	0.0317	0.178	0.178	0.555	0.555
Sandy clay loam	7.31	8.35	0.363	0.363	0.0133	0.0133	0.125	0.138	0.443	0.443
Clay loam	3.66	3.51	0.3	0.305	0.0538	0.0564	0.186	0.186	0.529	0.564
Silty loam	4.21	5.04	0.312	0.324	0.0143	0.0242	0.179	0.179	0.48	0.48
Loam	5.61	6.57	0.308	0.302	0.071	0.071	0.12	0.131	0.443	0.43
Sandy loam	14.46	20.36	0.371	0.399	0.0122	0.0122	0.118	0.129	0.428	0.425
Loamy sand	74.31	89.12	0.357	0.434	0.0578	0.0705	0.057	0.056	0.428	0.428
R <sup>2</sup>	<b>0.9985</b>		<b>0.8610</b>		<b>0.9587</b>		<b>0.9886</b>		<b>0.9780</b>	
RMSE	<b>5.0745</b>		<b>0.040212</b>		<b>0.015648</b>		<b>0.00572</b>		<b>0.00785</b>	
45 days										
Texture	$K_s$ cm .day <sup>-1</sup>		$n$		$\alpha$		$\theta_r$		$\theta_s$	
	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me	Pr	Me
Clay	0.66	2.56	0.26	0.267	0.074	0.0865	0.219	0.219	0.64	0.64
Silty clay	0.36	0.53	0.301	0.302	0.0311	0.0333	0.188	0.188	0.493	0.556
Sandy clay	0.31	0.46	0.282	0.284	0.0491	0.0618	0.19	0.19	0.576	0.576
Silty clay loam	0.34	0.73	0.321	0.327	0.031	0.0317	0.178	0.178	0.555	0.555
Sandy clay loam	6.73	8.35	0.363	0.363	0.0133	0.0133	0.119	0.138	0.443	0.443
Clay loam	3.41	3.51	0.292	0.305	0.0421	0.0564	0.186	0.186	0.527	0.564
Silty loam	3.88	5.04	0.316	0.324	0.014	0.0242	0.166	0.179	0.45	0.48
Loam	5.17	6.57	0.302	0.302	0.0501	0.071	0.131	0.131	0.43	0.43
Sandy loam	12.79	20.36	0.371	0.399	0.0122	0.0122	0.119	0.129	0.428	0.425
Loamy sand	68.36	89.12	0.357	0.434	0.0517	0.0705	0.057	0.056	0.428	0.428
R <sup>2</sup>	<b>0.9979</b>		<b>0.8594</b>		<b>0.9402</b>		<b>0.979381</b>		<b>0.9209</b>	
RMSE	<b>7.0363</b>		<b>0.0443</b>		<b>0.02519</b>		<b>0.01236</b>		<b>0.0382</b>	

Pr=predicted Me=Measured

The predicted values of the hydraulic parameters were obtained through inverse simulation conducted in the laboratory with soil water evaporation measurement data for 5 days. These values were used to simulate and predict the soil water infiltration values using HYDRUS-1D (Figure 3).

Figure 4 shows the soil moisture characteristic tension curve, which was computed using the van Genuchten parameters from Table 3. These results show a different degree of agreement between the predicted and measured water content values.

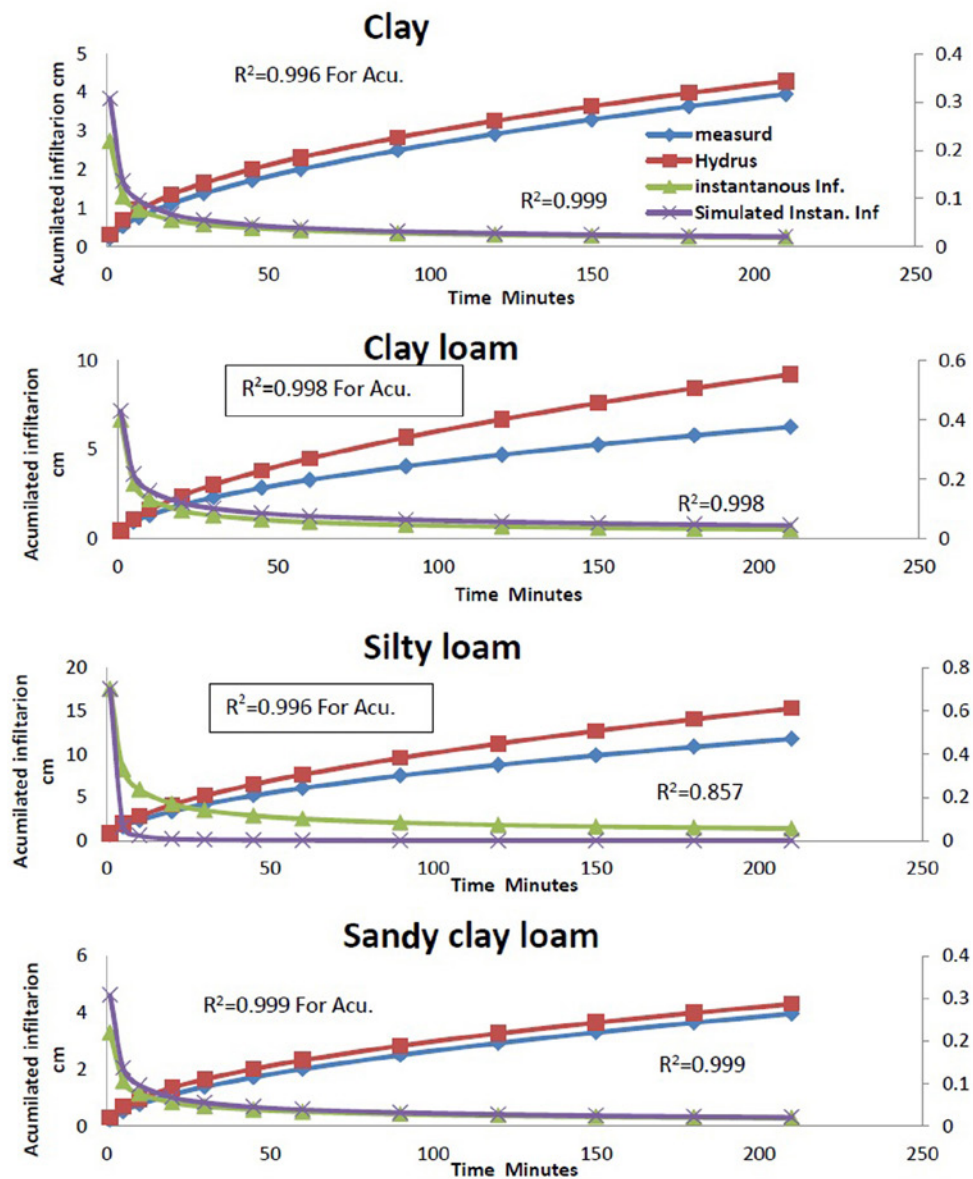
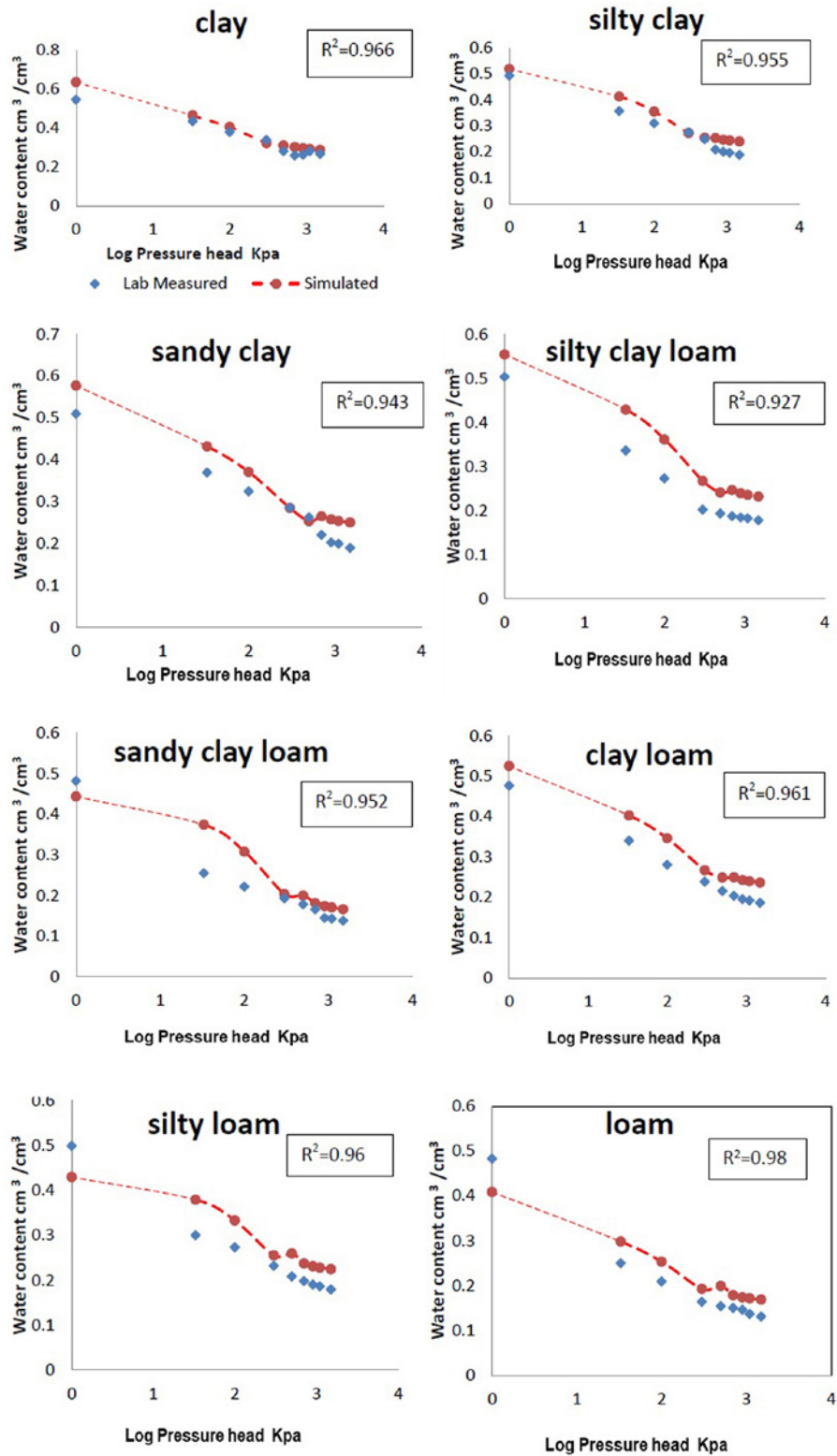
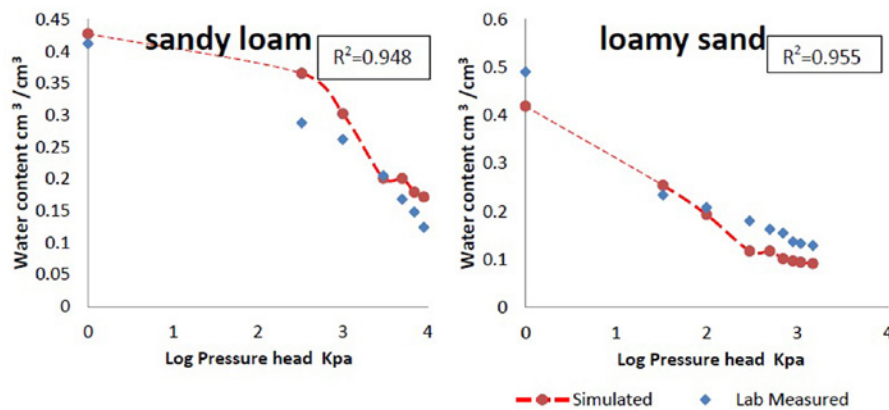


Figure 3. Measured and simulated cumulative infiltration curves and instantaneous infiltration rate







**Figure 4.** Water retention,  $\Theta(h)$ , curves obtained through inverse simulation of laboratory soil evaporation for 5 days

**Table 4.** Correlation matrix and variance inflation factor between soil hydraulic parameters and some soil characteristics

	<i>Pb</i>	Clay%	Silt%	Sand%	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	<i>n</i>	$K_s$
<b>Pb</b>	<b>1</b>	<b>-0.8507</b>	-0.4666	<b>0.8039</b>	-0.3940	<b>-0.6522</b>	0.1805	0.4629	<b>0.6921</b>
<b>Clay%</b>	<b>-0.8507</b>	<b>1</b>	0.4218	<b>-0.8781</b>	0.4232	0.5038	0.0254	-0.3442	-0.4618
<b>Silt%</b>	-0.4666	0.4218	<b>1</b>	<b>-0.8042</b>	0.3831	<b>0.6555</b>	-0.0740	<b>-0.6426</b>	<b>-0.7536</b>
<b>Sand%</b>	<b>0.8039</b>	<b>-0.8781</b>	<b>-0.8042</b>	<b>1</b>	-0.4796	<b>-0.6762</b>	0.0223	<b>0.5647</b>	<b>0.7004</b>
$\theta_s$	-0.3940	0.4232	0.3831	-0.4796	<b>1</b>	<b>0.8573</b>	0.3638	<b>-0.7866</b>	<b>-0.5197</b>
$\theta_r$	<b>-0.6522</b>	0.5038	<b>0.6555</b>	<b>-0.6762</b>	<b>0.8573</b>	<b>1</b>	0.0400	<b>-0.8920</b>	<b>-0.8577</b>
$\alpha$	0.1805	0.0254	-0.0740	0.0223	0.3638	0.0400	<b>1</b>	-0.3379	0.2184
<i>n</i>	0.4629	-0.3442	<b>-0.6426</b>	<b>0.5647</b>	<b>-0.7866</b>	<b>-0.8920</b>	-0.3379	<b>1</b>	<b>0.8045</b>
$K_s$	<b>0.6921</b>	-0.4618	<b>-0.7536</b>	<b>0.7004</b>	<b>-0.5197</b>	<b>-0.8577</b>	0.2184	<b>0.8045</b>	<b>1</b>
variance inflation factor (VIF)									
<b>Pb</b>		3.621	0.278	2.827	0.184	0.740	0.034	0.273	0.920
<b>Clay%</b>	3.621		0.216	4.368	0.218	0.340	0.001	0.134	0.271
<b>Silt%</b>	0.278	0.216		2.831	0.172	0.754	0.006	0.703	2.315
<b>Sand%</b>	2.827	4.368	2.831		0.299	0.842	0.001	0.468	0.963
$\theta_s$	0.184	0.218	0.172	0.299		3.775	0.153	2.623	0.370
$\theta_r$	0.740	0.340	0.754	0.842	3.775		0.002	4.897	3.783
$\alpha$	0.034	0.001	0.006	0.001	0.153	0.002		0.129	0.050
<i>n</i>	0.273	0.134	0.703	0.468	2.623	4.897	0.129		2.836
$K_s$	0.920	0.271	2.315	0.963	0.370	3.783	0.050	2.836	

**Note:** bold entries mean a significance level of 0.05

## DISCUSSION

The measured and predicted values of the soil hydraulic parameters shown in [Table 2](#) show a good agreement between the predicted and the measured values, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) ranging from 0.78 to 0.9999, and the values of the root mean square error (RMSE) ranging from an extremely small value of 0.000012 up to 0.146. However, the highest and the lowest values of both the  $R^2$  and RMSE (0.99 and 0.00012, respectively) were obtained at 20 days of evaporation. These results agree with [Minasny and McBratney \(2002\)](#) and [Simunek et al. \(2012\)](#) who indicated the possibility of using inverse modeling to predict the values of some soil hydraulic parameters under field conditions. The low agreement resulting from the simulation of the parameter  $n$  at 10 and 45 days of evaporation meant the lowest and highest values for  $R^2$  and RMSE (0.948 and 0.0153, respectively). Moreover, the results showed a good agreement between the predicted and the measured values of  $K_s$  for all periods of evaporation. The values of  $R^2$  ranged from 0.975 to 0.999, but the RMSE values ranging from 0.18 to 0.25 at two measurement periods (10 and 20 days in the relay). The estimation of the values of  $\theta_r$ ,  $K_s$ , and  $n$  is predominantly better than that for  $\theta_s$  and  $\alpha$  over the entire periods of evaporation measurement ([Table 2](#)). The predicted values of the soil hydraulic parameters ( $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$ , and  $n$ ) obtained through inverse modeling were close to the measured ones. This is due to the capabilities of the HYDRUS-1D software concerning inverse modeling for field conditions and soil characteristics. Moreover, this method yielded the least variations and had a high accuracy. These results are validated by [Hopmans et al. \(2002\)](#), [Simunek and van Genuchten \(2008\)](#), [Samani and Fathi \(2009\)](#), and [Simunek et al. \(2012\)](#). Moreover, they allow stating that inverse modeling is simple to implement and does not take a long time. It also constitutes a predictive function with high flexibility and precision under field conditions.

The  $\theta_s$ ,  $n$ ,  $\alpha$ , and  $\theta_r$  values, which were predicted through the inverse modeling under laboratory conditions were close to their measured values. This was confirmed by the statistical indices (the  $R^2$  ranged from 0.81 to 0.99, and the RMSE ranged from 0.0057 to 0.6291). The highest correlation appeared at 20 days of evaporation measurement. These results confirm the efficiency of inverse modeling on the HYDRUS software to predict van Genuchten equation parameters, as indicated by [Kelleners et al. \(2005\)](#), [Scharnagl et al. \(2011\)](#), [Simunek et al. \(2011\)](#), and [Schelle et al. \(2012\)](#).

The results in [Table 4](#) showed a high correlation between  $\theta_r$  and  $K_s$ , and also between  $n$  and  $\theta_s$ , which indicate parameter nonuniqueness and a correspondingly high uncertainty these results agree with the [Kirkham et al \(2019\)](#), also a good correlation between the parameters of  $\theta_r$ ,  $n$ , and  $K_s$  with each of the silt %, sand% and soil bulk density, can be used to predict these soil hydraulic parameters values from the routine soil analysis. This correlation can be used to predict soil hydraulic parameter values. This result agrees with [Mohammed et al. \(2019\)](#), who used Artificial Neural Networks (ANNs) to estimate soil hydraulic parameters from some soil characteristics with high accuracy. The values of variance inflation factor (VIF) in [Table 4](#) show that there was no multicollinearity between the variables under study, as the values were less than 10.

The predicted and measured values of the cumulative infiltration curves and the instantaneous infiltration rate showed a good agreement for all soils of different textures under study, with  $R^2$  values ranging from 0.998 to 0.999 ([Figure 4](#)). These results agree with those in [Amini et al. \(2020\)](#).

The values of the van Genuchten parameters in [Table 3](#) were used to obtain the soil moisture characteristic tension curve, and they were compared with measured values, thus showing a good agreement between them, with  $R^2$  values ranging from 0.927 to 0.981 ([Figure 4](#)). A little variation is noticed between predicted and measured values of the soil water retention curves, which may be due to

the soil hysteresis phenomenon, as mentioned by Rezaei *et al.* (2016).

Several pressure heads were used to predict the moisture content of all soil samples with ten different soil textures. Different degrees of agreement were found, as it can be noticed from the  $R^2$  (0.6130. 0.8609, 0.8574. 0.8780. 0.8732. 0.9559, 0.9045. 0.8828, and 0.9085) and the RMSE values (0.053. 0.042. 0.025. 0.028, 0.020. 0.034. 0.039, 0.039, and 0.042) for soil water content at pressure heads of 33. 100. 300. 500. 700. 900. 1.100. and 1.500 Kpa, respectively. The lowest and highest agreement between the predicted and measured values of the water content were obtained at pressures of 0 and 700 Kpa in ten different soil textures. The variation of these results may be due to the anisotropy of the soil, as reported by Šimunek *et al.* (1998b), who argued that “the overprediction of  $\theta_s$  for the inverse solution could be caused by the anisotropy of the soil” as they work on parameter estimation of the hydraulic properties of unsaturated soil.

## CONCLUSIONS

Inverse modeling using the HYDRUS-1D software could be used successfully and accurately with low computation times to predict some soil hydraulic parameters from data obtained from soil water evaporation measured both in the field and in a laboratory. This showed a good agreement relationship with the measured data for the ten different soil textures.

The inverse model of HYDRUS-1D was used with high accuracy to predict the accumulated infiltration values from soil water evaporation data for 5 days in a laboratory experiment.

Meanwhile, this model was applied to the predicted van Genuchten parameters to get the volumetric soil water content at each different pressure heads, thus resulting in a good agreement with the measured values. The inverse modeling procedure using laboratory soil evaporation data was very

good for predicting some soil hydraulic parameters and estimating a cumulative infiltration and soil water retention curve with a relatively fast, simple, and reliable alternative method, in addition to reducing the costs and time of determining laboratory and field measurements.

## REFERENCES

- Amini, M., Ebrahimian, H., Liaghata, A. & Fujimaki, H. (2019). Unsaturated Soil Hydraulic Properties according to Double-Ring Infiltration of Saline Water. *Eurasian Soil Science*, 53. 1596-1609. <https://doi.org/10.1134/S1064229320110022>
- Fujimaki, H., & Yanagawa, A. (2019). Application of evaporation method using two torsimeters for determining unsaturated hydraulic conductivity beyond tensiometric range. *Eurasian Soil Science*, 52. 405-413. <https://doi.org/10.1134/S1064229319040069>
- Guellouz, L., Askri, B., Jaffré, J., & Bouhlila, G. (2020). Estimation of the soil hydraulic properties from field data by solving an inverse problem. *Nature*, 10(1), 9359. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66282-5>
- Hachimi, M., Maslouhi, A., Tamoh, K., & Qanza, H. (2019). Estimation of soil hydraulic properties of basin Loukkos (Morocco) by inverse modeling. *KSCIE Journal of Civil Engineering*, 23(3), 1407-1419. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0628-7>
- Hopmans, J. W., Simunek, J., Romano, N., & Durner, W. (2002). Inverse methods. In J. J. Dane & G. C. Topp (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 4: physical methods. 3rd ed.* (pp. 963-1008). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c40>
- Kelleners, T. J., Soppe, R. W., Ayars, J. E., Simunek, J., & Skaggs, T. H. (2005). Inverse Analysis of upward water flow in a Ground water Table lysimeter. *Vadose Zone Journal*, 4. 558-572. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.0118>

- Kirkham, J. M., Smith, C. J., Doyle, R. B., & Brown, P. H. (2019). Inverse modelling for predicting both water and nitrate movement in a structured-clay soil (Red Ferrosol). *PeerJ*, 16(6). e6002.  
<https://doi.org/10.7717/peerj-6002>
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.  
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed>
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2002). The Neuro-m Method for Fitting Neural Network Parametric Pedotransfer Functions. *Soil Science Society of America*, 66, 352-361.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1407a>
- Mohammed, E. M., Qassab, S. A., & Salih, F. A. (2019, October 3-5). *Application of Artificial Neural Network to Predict Some Water Hydraulic Functions and Parameters for Some Soils in Nineveh Province / Iraq* [Conference presentation]. 6th International Conference on Sustainable Agriculture and Environment, Ankara, Turkey.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous-media. *Water Resources Research*. 12(3), 513-522.  
<https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Ritter, A., Hupet, F., Munoz-Carpena, R., Lambot, S. , & Vanclooster, M. (2003). Using inverse method for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agricultural Water Management*, 59, 77-96.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00160-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00160-9)
- Rezaei, M., Seuntjens, P., Shahidi, R., Joris, I., Boenne, W., Al-Barri, B., & Cornelis, W. M. (2016). The relevance of in situ and laboratory characterization of sandy soil hydraulic properties for soil water simulations. *Journal of Hydrology*, 534. 251-265.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.062>
- Samani, J. M., & Fathi, P. (2009). Estimation of unsaturated soil hydrodynamic parameters using Inverse problem Technique. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 10. 199-210.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., & van Genuchten, M. Th. (2001). Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3-4), 163-176.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8)
- Scharnagl, B., Vrugt, J. A., Vereecken, H., & Herbst, M. (2011). Inverse modeling of in situ soil water dynamics: Investigating the effect of different prior distributions of soil hydraulic parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15. 3043-3059.  
<https://doi.org/10.5194/hess-15-3043-2011>
- Schelle, H., Iden, S.C., Fank, J., & Durner, W. (2012). Inverse modeling of water flow in lysimeter. *Geophysical Research*, 13(3), 435-442.
- Simunek, J., Angulo-Jaramillo, R., Schaap, M. G, Martinus, J. V., & Van Genuchten, Th. (1998a). Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soil from tension-disc infiltrometer data. *Geoderma*, 86, 61-81.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00035-4)
- Simunek, J., van Genuchten, M. Th., Gribb, M. M., & Hopmans, J. (1998b). Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient flow processes. *Soil Tillage Res*, 47(1-2), 27-36.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00069-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00069-5)
- Simunek, J., & van Genuchten, M. Th. (1999). Using the HYDRUS-1D and HYDRUS-2D codes for estimating unsaturated soil hydraulic and solute transport parameters. In M. Th. van Genuchten, F. J. Leij, & L. Wu (Eds.) *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media* (pp. 1523-1536). University of California.
- Simunek, J. & van Genuchten, M. Th. (2008). Modeling Non equilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 7, 782-797.  
<https://doi.org/10.2136/vzj2007.0074>
- Simunek, J., Neumann, L. E., & Cook F.J. (2011). Implementation of quadratic upstream interpolation schemes for solute transport into HYDRUS-1D. *Environmental Modeling and Software*, 26(11), 1298-1308.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.05.010>
- Simunek, J., van Genuchten, M. Th., & Sejna, M. (2012). HYDRUS: Model use calibration and validation. *Procedures for Model Calibration and Validation*

*Transactions of the ASABE*, 55(4), 1261-1274.

<https://doi.org/10.13031/2013.42239>

Simunek, J., Sejna, M., & van Genuchten, M. Th. (2013). *The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, version 4.17, HYDRUS Software Series 3*. Department of Environmental Sciences, University of California.

van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America*. 44(5), 892-898.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



## Exploración y comparación de la distribución espacial de los bosques periurbanos en Mérida, Venezuela

### Exploration and comparison of spatial distribution of peri-urban forests in Mérida, Venezuela

Deyriana del Valle Vásquez-Rivas<sup>1</sup>, Jesús Enrique Andrades-Grassi<sup>1\*</sup>, Luis E. Gámez<sup>1</sup>  
y Gerardo Gabriel Rodríguez L.<sup>1</sup>

Vásquez-Rivas, D. V., Andrades-Grassi, J. E., Gámez, L. E. y Rodríguez-L., G. G. (2022). Exploración y comparación de la distribución espacial de los bosques periurbanos en Mérida, Venezuela. *Colombia Forestal*, 25(1), 36-50.

**Recepción:** 24 de mayo 2021

**Aprobación:** 6 de septiembre 2021

#### Resumen

Los patrones de puntos espaciales son una aproximación para el análisis de la estructura funcional del bosque. En este sentido, se evaluó y comparó la distribución espacial de árboles en bosques periurbanos de Mérida, Venezuela. Se planteó la hipótesis nula de la Aleatoriedad Espacial Completa (CSR), aplicando métodos exploratorios y confirmatorios espaciales sin marcas (e involucrando las marcas para las variables dasométricas) y pruebas de patrones puntuales multivariantes ( $\alpha = 0.05$ ) a parcelas de bosque primario y secundario (cinco en c/u). Ambos bosques exhibieron una densidad media similar (310 y 339 ind.ha<sup>-1</sup>). Además, se identificó un proceso CSR para los árboles sin considerar marcas en las variables de altura total y DAP, y en las marcas remanentes de volumen y especie este fue catalogado como no aleatorio, pues no se presentaron diferencias entre los procesos espaciales multivariantes. Se recomienda, por lo tanto, ampliar el área de trabajo y aplicarlo en bosques mejor diferenciados.

**Palabras clave:** biometría, bosques andinos, distribución espacial, estadística espacial, patrones de puntos espaciales, vegetación.

#### Abstract

Spatial point patterns are a novel approach for the analysis of forest functional structure. The spatial distribution of trees in peri-urban forests of Mérida (Venezuela) was evaluated and compared. The null hypothesis of Complete Spatial Randomness (CSR) was proposed, applying spatial exploratory and confirmatory methods without marks, and involving marks for dasometric variables, and multivariate point pattern tests ( $\alpha = 0.05$ ) to five plots of primary forest and five plots of secondary forest. Both forest types exhibited similar mean density (310 and 339 ind.ha<sup>-1</sup>). Besides, a CSR process was identified for the trees without considering marks of the height and DBH, and in the remaining volume and species marks, the process was identified as non-random. Likewise, there are no differences between the multivariate spatial processes. It is recommended to extend the work area and to apply it in better differentiated forests.

**Keywords:** biometrics, andean forests, spatial distribution, spatial statistics, spatial point patterns, vegetation.

<sup>1</sup> Universidad de Los Andes (ULA), Mérida, Venezuela.

\* Autor para correspondencia: [koflasjesus@gmail.com](mailto:koflasjesus@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

Los bosques son los reservorios de la diversidad biológica más importante del planeta debido a que sirven de hábitats para plantas, animales y microorganismos; estos se definen formalmente como “tierras que se extienden por más de 0.5 ha, dotadas de árboles de una altura superior a los 5 m, con una cubierta de dosel mayor al 10%, o de árboles capaces de alcanzar esta altura *in situ*”, y se categorizan en bosques primarios y secundarios (FAO, 2010, p. 217). Los bosques primarios están compuestos de especies autóctonas cuya característica principal radica en presentar dinámicas forestales naturales, estructuras disetáneas y procesos naturales de regeneración, y no evidencian intervenciones significativas de origen antrópico. En contraposición, los bosques secundarios presentan como rasgo común “el disturbio o perturbación al ecosistema, pudiendo ser causado u originado naturalmente, o bien por el hombre como actor principal” (Smith *et al.*, 1997, p. 2).

De igual forma, se presentan otras clases de bosques como los “Bosques Periurbanos”, que corresponden a sistemas boscosos o grupos de árboles individuales ubicados en las periferias de las ciudades (FAO, 2016) y que cumplen con una función de amortiguamiento y transición entre las zonas urbanas y las rurales (Douglas, 2005). Es importante resaltar que estos bosques son áreas susceptibles o vulnerables a altos niveles de perturbación de origen antrópico (Torres y Pérez, 2008).

Ahora bien, Li y Zhang (2007) manifiestan que el estudio del patrón espacial genera información esencial, pues representa de forma estadística una variedad de procesos físicos-ecológicos en los bosques, como la competencia, variabilidad, distribución del tamaño, entre otros. Conforme a esto, Penttinen y Stoyan (2000) señalan que el estudio del patrón espacial y sus características son herramientas valiosas para los análisis de datos exploratorios en silvicultura con el fin de describir

la variabilidad de las masas forestales. Por tanto, para un análisis de la diversidad biológica es útil el estudio del patrón espacial de las interacciones de individuos en comunidades ecológicas que permitan revelar las correlaciones locales de estos y su comportamiento (Murrell y Law, 2003). Al respecto, Olaya (2014) indica que, para poder efectuar un análisis de este tipo, debe disponerse en cada una de las observaciones de los eventos (en este caso, los árboles) de una coordenada asociada, lo que aporta una información adicional más minuciosa del fenómeno. Así, la distribución espacial de especies ha sido extensamente estudiada en diversos ecosistemas (Fisher *et al.*, 2007; Isaacs, 2011; Linares-Palomino, 2005; Rozas y Camarero, 2005) donde se han aplicado técnicas de análisis estadístico de carácter espacial, como la función K de Ripley, los patrones de puntos marcados, el análisis de cuadrantes, el test Kolmogorov–Smirnov (K-S), el I de Moran y el LISA, con la idea de conocer cómo se comportan las especies animales y vegetales dentro de ecosistemas particulares.

En el caso de los bosques periurbanos de la ciudad de Mérida (Venezuela), estos fueron estudiados previamente por Rodríguez (2015), quien analizó su estructura y composición florística, tomando como referencia varios puntos entre los 1 700 y 2 400 m de altitud. Como resultado, logró diferenciar claramente bosques maduros y sucesionales existentes en el área de estudio que le permitieron escoger –bajo criterios florísticos y ecológicos– los sitios idóneos para el establecimiento de las parcelas a levantar. El autor reportó 102 especies, pertenecientes a 44 familias y 70 géneros, incluyendo dos indeterminadas; 76 especies en los bosques maduros y 50 especies en los sucesionales.

Sin embargo, el autor no consideró en su análisis el elemento de distribución espacial interna de cada parcela, por lo que se desconocen las interacciones de los individuos y su estructura y diferenciación espacial entre las categorías de bosques analizados. Por consiguiente, la pregunta a

ser considerada en esta investigación fue: ¿los patrones espaciales de los bosques primarios y secundarios son estadísticamente iguales? De aquí surge la necesidad de estudiar la distribución espacial de los individuos y sus implicaciones en el análisis de los procesos de intervención en los bosques, y la razón por la cual se realizó el presente trabajo, poniendo el foco de la investigación forestal en los bosques periurbanos, aplicando técnicas de patrones puntuales en parcelas establecidas en la ciudad de Mérida (Venezuela).

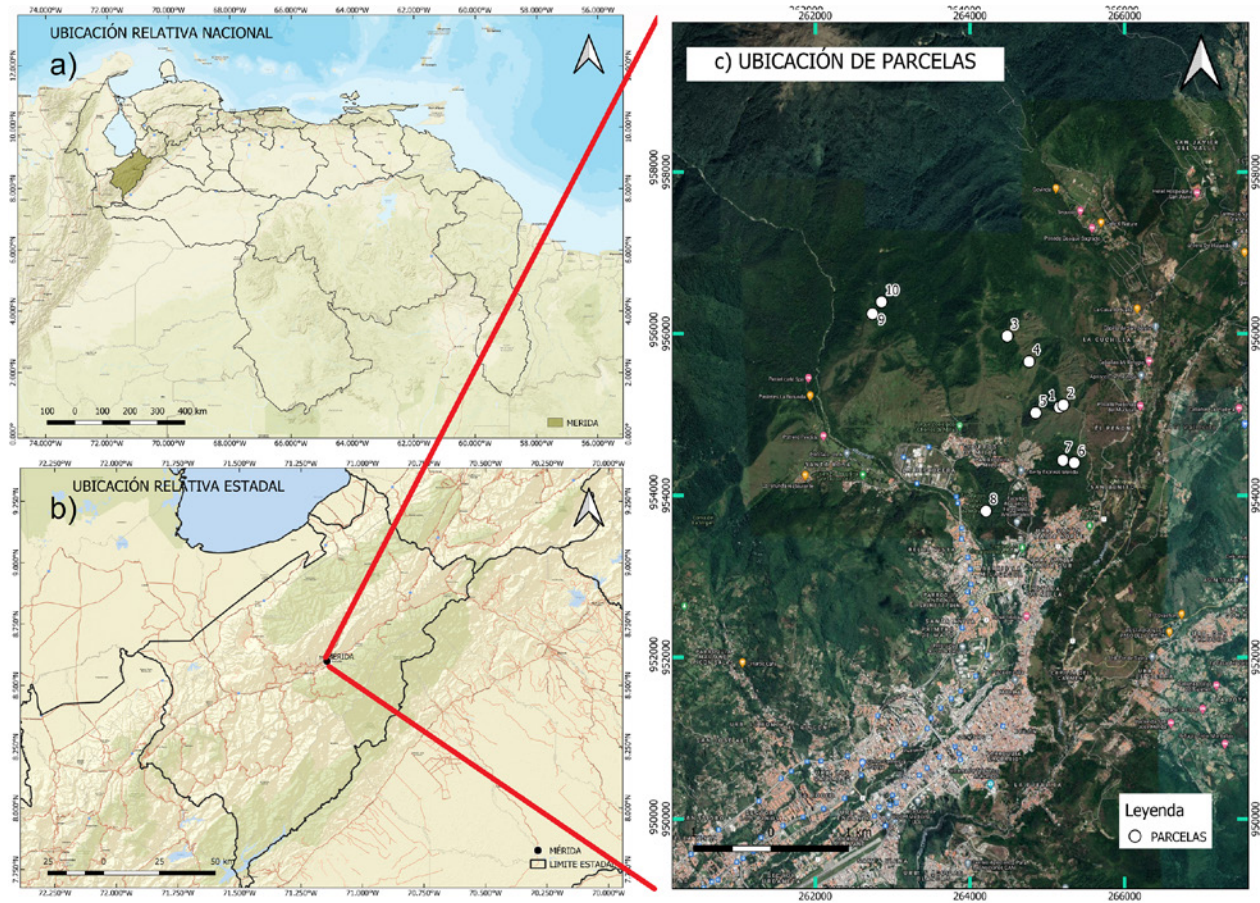
El hecho de concederle características espaciales a fenómenos ecológicos naturales puede abordarse desde distintas aproximaciones de estadística espacial (Cressie, 1993; de la Cruz Rot, 2006); entre ellas, se puede encontrar los patrones o procesos puntuales que se definen formalmente como un proceso espacial con localizaciones de eventos  $\{Z(s): s \in D\}$ , donde  $Z(\cdot)$  eventos son aleatorios en el espacio  $D$  y cuyo proceso puede ser discreto o continuo (Cressie, 1993; Giraldo, 2009). Cabe indicar que el proceso más simple es el de Aleatoriedad Espacial Completa (también conocido como Poisson Homogéneo -CSR-), es decir, la ubicación espacial de los eventos no tiene influencia sobre el proceso estocástico (Baddeley, 2008; Cressie, 1993). Por el contrario, existen otros patrones cuyo comportamiento de la función de densidad espacial no es aleatoria e independiente (Legendre y Legendre, 1998; Lloyd, 2010), pues a diferencia de las técnicas geoestadísticas y los análisis de datos de áreas, los patrones puntuales parten del hecho de que el conjunto de los eventos son aleatorios; en otras palabras, la decisión respecto de donde se hace la medición no depende del investigador, ya que el evento se mide en donde ocurre y no donde el usuario desea (de la Cruz Rot, 2006), mientras que las preguntas de interés en un proceso de distribución espacial se centran en si los eventos se comportan de una forma más o menos agregada o regular de lo que se esperaría (Baddeley, 2008; Legendre y Legendre, 1998; Lloyd, 2010).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de campo fueron recolectados por Rodríguez (2015) en los bosques de la zona norte de la ciudad de Mérida (Venezuela), entre los 1700 m y 2400 m de altitud (Figura 1). Los sitios se encuentran ubicados entre las unidades ecológicas de la Selva Semicaducifolia Montana y la Selva Nublada Montana Baja, donde las temperaturas medias anuales oscilan entre los 13 °C a 18 °C (Ataroff y Sarmiento, 2004), con una precipitación media anual aproximada de 1800 mm (López, 1976). Estos lugares se caracterizan por sus comunidades boscosas densas, compuestas por árboles entre los 10 m y 20 m de alto, con elevado epifitismo, y donde abundan los helechos, musgos, hepáticas, orquídeas y bromelias (Rodríguez et al., 2010).

En esta área Rodríguez (2015) estableció diez unidades muestrales (parcelas), cinco en zonas aparentemente no intervenidas (bosques primarios; parcelas 1, 2, 3, 9 y 10) y cinco en bosques secundarios (parcelas 4, 5, 6, 7 y 8); las unidades muestrales se establecieron mediante varios recorridos y visitas de campo, y por medio de los análisis prospectivos se determinó el estado sucesional de los bosques. Cada una de las parcelas estuvo conformada por franjas de 50 m de largo por 10 m de ancho, 5 m a cada lado de su línea central, y para cada unidad muestral se seleccionó un fragmento representativo de cada tipo de bosque con el fin de elaborar un perfil estructural (vertical y horizontal) de vegetación de acuerdo al método de Richards (1983). Así, se elaboró un perfil estructural a partir de un tramo de 50 m x 5 m. El levantamiento de los datos para el perfil incluyó: la ubicación o posición del individuo (coordenadas  $x$ ,  $y$ ), el DAP de todos los individuos  $\geq 2.5$  cm, la altura total (m), el volumen ( $m^3$ ) y la especie. Para la ubicación de los árboles en la parcela se estableció un plano de coordenadas, siendo el eje  $X$  la franja central de 50 m de la parcela y el eje  $Y$  uno de los bordes de 5 m; además, a cada árbol dentro de la parcela de 50 m x 5 m se le determinó su posición ( $X$ ,  $Y$ ) respecto a los ejes.





**Figura 1.** Ubicación del área de estudio de los bosques periurbanos de Mérida, Venezuela: (a) relativa nacional, (b) relativa estatal y (c) ubicación de las parcelas.

Es importante acotar que no se pudo efectuar una corrección de posición de los individuos por pendiente, ya que no se disponían los datos altitudinales de alta precisión para realizar dicho procedimiento.

Con relación al análisis de la distribución espacial en cada una de las parcelas se asumió una condición de un proceso estocástico de patrón de punto:  $\{Z(s): s \in D\}$ , donde  $s \in \mathbb{R}^d$  representa una ubicación en el espacio euclidiano  $d$ -dimensional,  $Z(s)$  es una variable aleatoria en la ubicación  $s$  y  $s$  varía sobre un conjunto de índices  $D \subset \mathbb{R}^d$ ;  $Z(\cdot)$  y  $D$  son aleatorios (CSR). Este proceso es la hipótesis nula planteada en esta investigación (Cressie, 1993; Giraldo, 2009). Para contrastar dicha hipótesis estadística se aplicaron técnicas

correspondientes a patrones de puntos, como lo son: la función  $K$  Ripley, el análisis de los Cuadrantes y el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (Acevedo, 2013; Dale y Fortin, 2014) ( $\alpha = 0.05$ ). Y para el análisis de patrones puntuales se aplicó lo determinado por Pélissier (1998), Penttinen y Stoyan (2000) y Li y Zhang (2007): si se desea probar la intensidad espacial de los árboles de cada parcela ( $\text{ind.m}^{-2}$ ) y el rango de la estructura espacial de las parcelas (interacciones entre los individuos), se parte del supuesto de que se realizó un mapeo exhaustivo de todos los eventos (Dale y Fortin, 2014). El análisis de los patrones puntuales fue realizado con el software libre R (R Core Team, 2014) en las librerías Rcmdr (Fox, 2005, 2017;

Fox y Bouchet-Valat, 2018), Maptools (Bivand et al., 2013) y Spatstat (Baddeley et al., 2016), y se realizó un pre-procesamiento con el propósito de convertir cada una de las parcelas en bases de datos espaciales de formato Shapefile –para ello se utilizó el software libre de Sistemas de Información Geográfica Qgis (Lacaze et al., 2018)–.

Por un lado, se aplicó la función K de Ripley, que es utilizada para describir la relación entre cada uno de los eventos localizados en un área predeterminada; su estimador es  $\hat{K}(r) = \frac{1}{N\hat{\lambda}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n I(d_{ij})$ ;  $\hat{\lambda} = N/A$ , donde  $N$  es el número de puntos del patrón,  $A$  la superficie del área de estudio e  $I(d_{ij} < r)$  la función indicadora, que toma el valor de 1 si la distancia entre los puntos  $i$  y  $j$  es menor que  $r$ , y 0 en el caso contrario (de la Cruz Rot, 2006; Dixon, 2002; Lloyd, 2010). Por otro lado, para corregir el efecto de borde y aquellos puntos situados cerca de la frontera de la zona de estudio se utilizó el estimador  $\hat{K}(r) = \frac{1}{N\hat{\lambda}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \frac{I(d_{ij})}{w_{ij}}$ ;  $\hat{\lambda} = N/A$ , donde el valor  $w_{ij}$  pondera los distintos puntos en función de su distancia al borde de la zona de estudio. Es importante resaltar que la función K de Ripley trata de incorporar la escala como una variable más del análisis, convirtiendo dicha dependencia en un hecho favorable en lugar de una desventaja (Olaya, 2014; Ripley, 1977, 1988); ello implica que este test no debe verse específicamente como una prueba de hipótesis, sino como una prueba de hipótesis aplicada para distintas escalas o distancias de análisis. Por su parte, Baddeley (2008) y Baddeley et al. (2010) reseñan que el test Kolmogorov-Smirnov (K-S) es una prueba eficaz que permite comparar las distribuciones observadas y esperadas de los valores de una función t-Student con base en una distribución empírica (ECDF) de la forma:  $E_n - n(i)/N$ , donde  $n(i)$  es el número de puntos menor que  $Y_i$  ordenados de menor a mayor (este test asume que los datos siguen un proceso CSR, determinado por el usuario).

Así mismo, se analizaron los patrones puntuales marcados (marcas), es decir, cuando los puntos se diferencian unos de otros por alguna cualidad

(especie, altura total, DAP y volumen) se emplean técnicas para el análisis de patrones marcados (de la Cruz Rot, 2008). En este sentido, se utilizó la función K descrita anteriormente, con modificaciones que incluyeron la ponderación del efecto que causa la inclusión de una variable y comparándolo con el efecto que tiene la misma sobre la función K, sin la inclusión de la variable de interés. En este caso la hipótesis nula es: el patrón de las entidades ponderadas por las variables no está significativamente más agrupado que el patrón subyacente de esas entidades; y para ello sólo se utilizaron las variables: especie, DAP (m), altura total y volumen de cada uno de los individuos, siendo el estimador de la función K ponderada con marcas:  $kmm(r) = E_0(\sum_{[x_n, m_x]} m(x_0)m(x_n) 1(0 < ||x_n - x_0|| \leq r)) / \lambda \mu_m^2$ ,  $r > 0$ , donde  $N_m$  es el patrón marcado,  $x_n$  y  $m(x_n)$  son un punto cualquiera y su marca,  $\lambda$  es la intensidad del patrón y  $\mu_m$  el valor medio de las marcas del patrón (de la Cruz Rot, 2008; Stoyan y Stoyan, 1994). Adicionalmente, con fines de mapear la densidad de cada una de las parcelas, se generaron los contornos de densidad espacial utilizando un núcleo gaussiano y cuya expresión es:  $k(h) = (1 - h^2/r^2)^2 \forall h \leq r$ , donde  $h$  es la distancia al punto y  $r$  el radio máximo de influencia (Olaya, 2014).

Una pregunta a ser considerada en este tipo de análisis fue: ¿los patrones espaciales de los bosques primarios y secundarios son estadísticamente iguales? Para responderla se aplicó la hipótesis del etiquetado aleatorio, en la que cada patrón individual sería una muestra aleatoria del patrón total y, por lo tanto, debido a la naturaleza de la función K:  $K(r)_{BP,P1} = K(r)_{BP,P2} = K(r)_{BP,P3} = K(r)_{BP,P4} \dots = K(r)_{BP,P10} = K(r)$  donde la hipótesis alternativa es la diferencia entre pares de funciones K, es decir,  $K(r)_{BP} - K(r)_{BS'}$  se evalúa si un patrón está más o menos agrupado que el otro (y a qué escala); mientras que en:  $K(r)_{BP,P1} = K(r)_{BP,P2}$ ;  $K(r)_{BP,P1} - K(r)_{BP,P3} \dots$  se estima la segregación de los procesos, permitiendo así comprobar si un tipo de patrón de punto tiende a estar rodeado por otros del mismo tipo (de la Cruz Rot, 2008).

Para probar estas hipótesis se aplicaron las funciones: K-cruzada y L-cruzada, que corresponden con generalizaciones de la función K y L aplicando una aproximación de patrones de puntos multi tipo, de tipo categórico univariado. La función K-cruzada es:  $K_{ij}(r) = \lambda_j K_{ij}(r)$ , donde  $K_{ij}(r)$  es la función K-cruzada y  $\lambda_j$  es la intensidad del patrón de tipo "j", que proporciona el número medio de puntos de tipo "j" dentro de un radio  $r$  alrededor de cualquier punto de tipo "i". De igual manera, se aplicó la función L-cruzada:  $L_{12}^*(r) = (K_{12}^*(r)/\pi)^{1/2}$  (de la Cruz Rot, 2008; Diggle, 1983; Harkness e Isham, 1983), así como la función multivariada I, cuyo estimador es  $I(y) = \sum_{i=1}^m p_i J_i(y) - J(y)$ ,  $J_i(y)$ , donde  $J$  es la función del patrón de tipo  $i$  y  $p_i$  su abundancia relativa, es decir,  $J(y)$  es la función  $J$  del patrón total ignorando las marcas de cada tipo; si las categorías son independientes entonces  $I(y) = 0$ , y si las desviaciones de  $I(y) < 1$  y  $I(y) > 1$  indican asociación negativa o positiva respectivamente (van Lieshout y Baddeley, 1996, 1999). Finalmente, se aplicó la función K-múltiple –que corresponde con una generalización de la función K–, analizada para patrones de puntos marcados arbitrariamente. Aquí se supone que  $x_i, x_j$  son subconjuntos, posiblemente superpuestos, de un proceso de punto marcado, por lo que la función K-múltiple  $\lambda_j K_{ij}(r)$  es igual al número esperado de puntos aleatorios adicionales de  $x_j$  dentro de una distancia  $r$  de un punto típico de  $x_i$ , mientras que  $\lambda_j$  es la intensidad de  $x_j$ , siendo esta intensidad la esperada para una cantidad de puntos de  $x_j$  por unidad de área (Diggle, 1983, 1986; Harkness e Isham, 1983; Lotwick y Silverman, 1982).

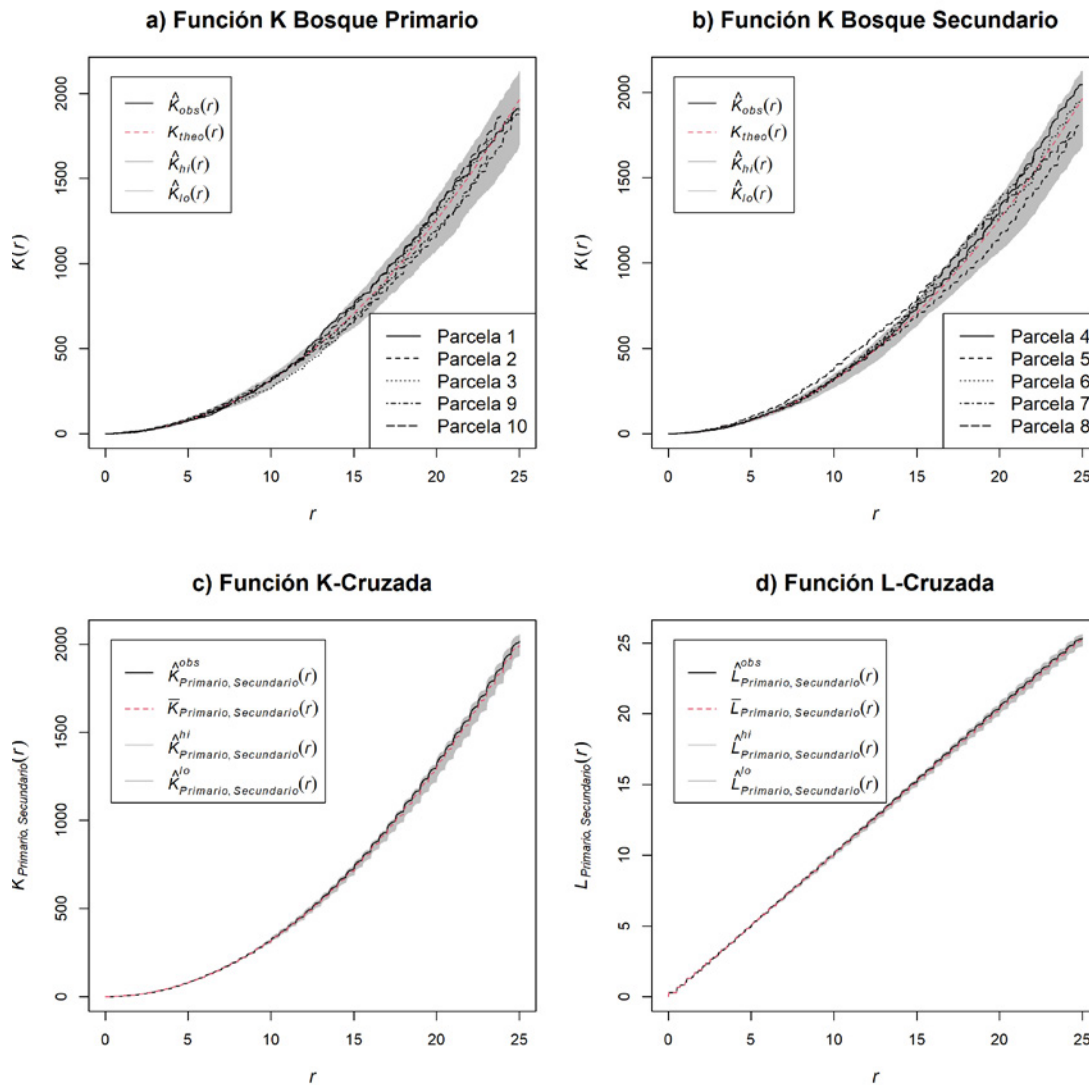
## RESULTADOS

Los resultados obtenidos del análisis de las parcelas establecidas en ambos tipos de bosques manifiestan un proceso CSR, ya que la función K de Ripley sin marcas se encuentra dentro de los intervalos de confianza de la hipótesis nula (color gris)

a lo largo de la distancia establecida la distancia  $r$  (Figuras 2a y 2b).

Estos resultados son refrendados por la figura de densidad espacial, donde los colores rojos, indican la presencia de una concentración mayor de individuos por unidad de superficie; esto se refleja en lo obtenido en la parcela 4, la cual es del tipo representativo de bosque secundario, mientras que la parcela 1 (de bosque primario) posee una densidad superior que la parcela de bosque secundario (Figura 3); estos resultados concuerdan con los obtenidos por Montañez Montañez Valencia et al. (2010) quienes reportaron una tendencia al incremento del gregarismo proporcional a la escala espacial en el estrato arbóreo, no obstante, en el sotobosque el grado de agrupamiento de las especies disminuyó a medida que aumentó la escala de análisis.

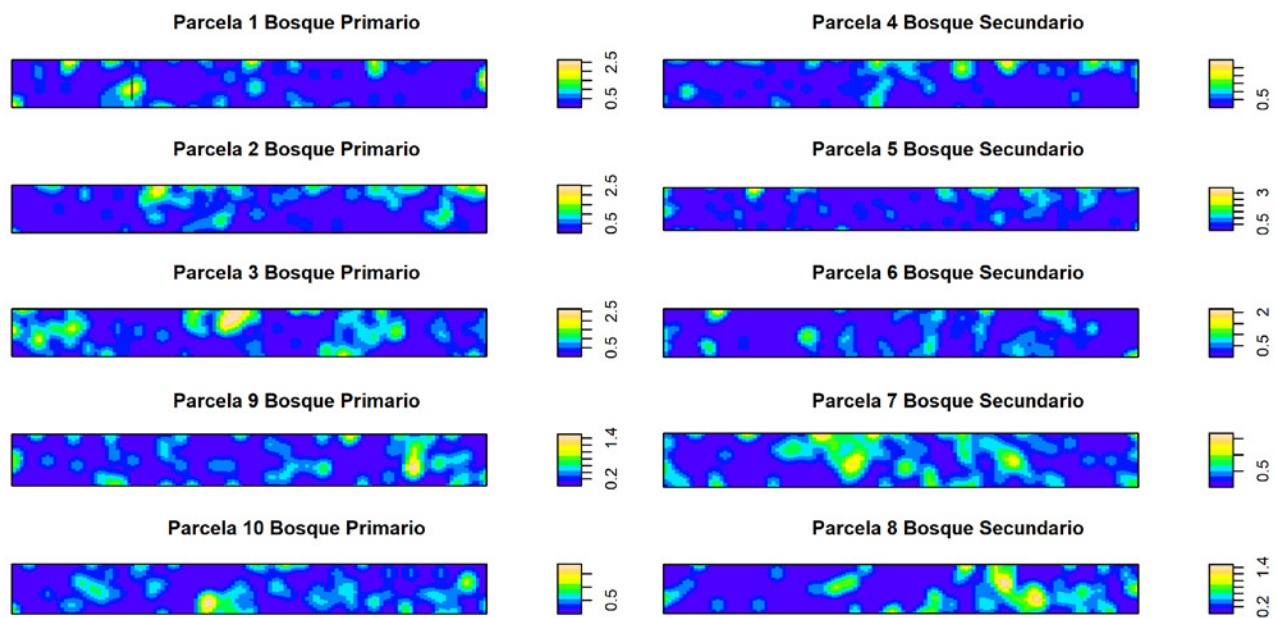
Entretanto, los resultados obtenidos por la función K-cruzada y L-cruzada, generan como consecuencia, que no se tiene evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de igualdad de los patrones espaciales de los bosques primarios y secundarios (Figuras 2c y 2d); esto es refrendado por el Test del análisis de Cuadrantes y el Test K-S, donde solamente para las parcelas 4 y 8 (de bosque secundario) y 2 (de bosque primario) se obtuvo evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de un proceso CSR. Adicionalmente, estos análisis reportan 407 individuos (53%) en la categoría bosque primario y 367 para la categoría secundario (47%), siendo lo más relevante la intensidad de los árboles por unidad de superficie, ya que la media de las intensidades de individuos es ligeramente mayor en el bosque primario (0.33 ind.m<sup>2</sup>) que en las parcelas de bosque secundario (0.31 ind.m<sup>2</sup>), las cuales podrían deberse a errores de conteo en campo. Dado que la densidad media de ambos bosques es prácticamente la misma (3 100-3 200 arb.ha<sup>-1</sup>), únicamente incrementando suficientemente el tamaño de la muestra se podría alcanzar a rechazar la hipótesis de igualdad de medias, o bien utilizando un nivel de significancia  $\alpha$  muy superior al 5%.



**Figura 2.** Comparación de parámetros espaciales entre tipos de bosques periurbanos de Mérida, Venezuela. Función K: (a) primario y (b) secundario, (c) Función K-Cruzada y (d) Función L-Cruzada.

Con la Función K sin marcas se obtuvo una línea base que indica el proceso que sigue los árboles de cada parcela sin involucrar una covariable, esto permitió comparar la línea base con los resultados ponderados por las variables en la función K con marcas (Baddeley, 2008; Baddeley et al., 2016), por tanto, se obtuvo el efecto que tienen las mismas sobre la distribución espacial de los árboles. El proceso que involucra las marcas manifiesta un mismo comportamiento CSR para las variables DAP

y altura, con lo cual no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula CSR para estas variables, no obstante, cuando se incluye la variable especie para ambos tipos de bosque cambia de agrupado hasta los cinco metros, esto implica que una misma especie tiende a mostrar agrupación en un radio de 5 m, antagónicamente, a partir de esta distancia el proceso espacial se convierte en regular. En tanto para el volumen, el proceso para el bosque secundario oscila cada cinco metros de agrupado



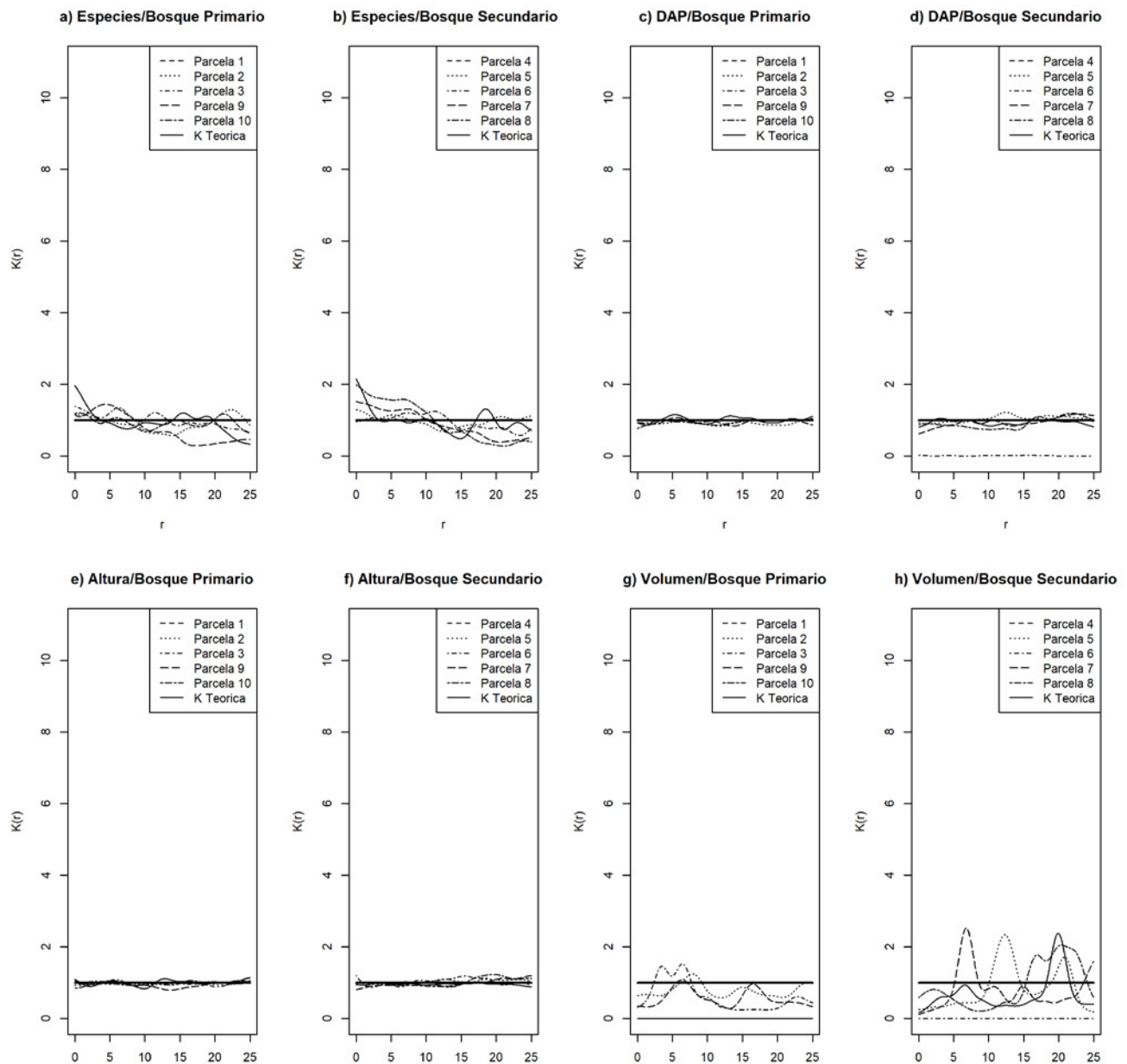
**Figura 3.** Comparación de parámetros espaciales (Densidad) entre bosque primario y bosque secundario. En parcelas de bosques periurbanos de Mérida, Venezuela.

a regular, mientras que para el bosque primario se genera un proceso exclusivamente de tipo regular (Figura 4). Finalmente, los resultados de la prueba K-múltiple manifiestan un proceso CSR para las marcas entre todas las escalas que tiende a generar diferencias cuando se trata de largas distancias (Figura 5a); pero, los resultados de la función I para las parcelas y para los tipos de bosques, indican que el proceso tiende a ser asociación negativa hasta 1 m en el caso de las parcelas y en el tipo de bosque hasta 0.8 m (Figuras 5b y 5c). Nótese que las diferentes curvas corresponden con el comportamiento de distintos estimadores de la función  $I(r)$  para un radio  $r$ ,  $r_s$  es el estimador de "muestra reducida" o "corrección de fronteras" de  $I(r)$  calculado a partir de las estimaciones corregidas de fronteras de las funciones  $J$ ,  $km$  el estimador espacial de Kaplan-Meier de  $I(r)$  calculado a partir de las estimaciones de Kaplan-Meier de las funciones  $J$ ;  $han$  es el estimador de estilo Hanisch de  $I(r)$  calculado a partir de las estimaciones de estilo Hanisch de las funciones  $J$ ;  $un$  es la estimación no corregida de  $I(r)$  y  $theo$  el valor teórico de  $I(r)$  para un

proceso de Poisson estacionario: idénticamente igual a 0 (Baddeley *et al.*, 2016).

## DISCUSIÓN

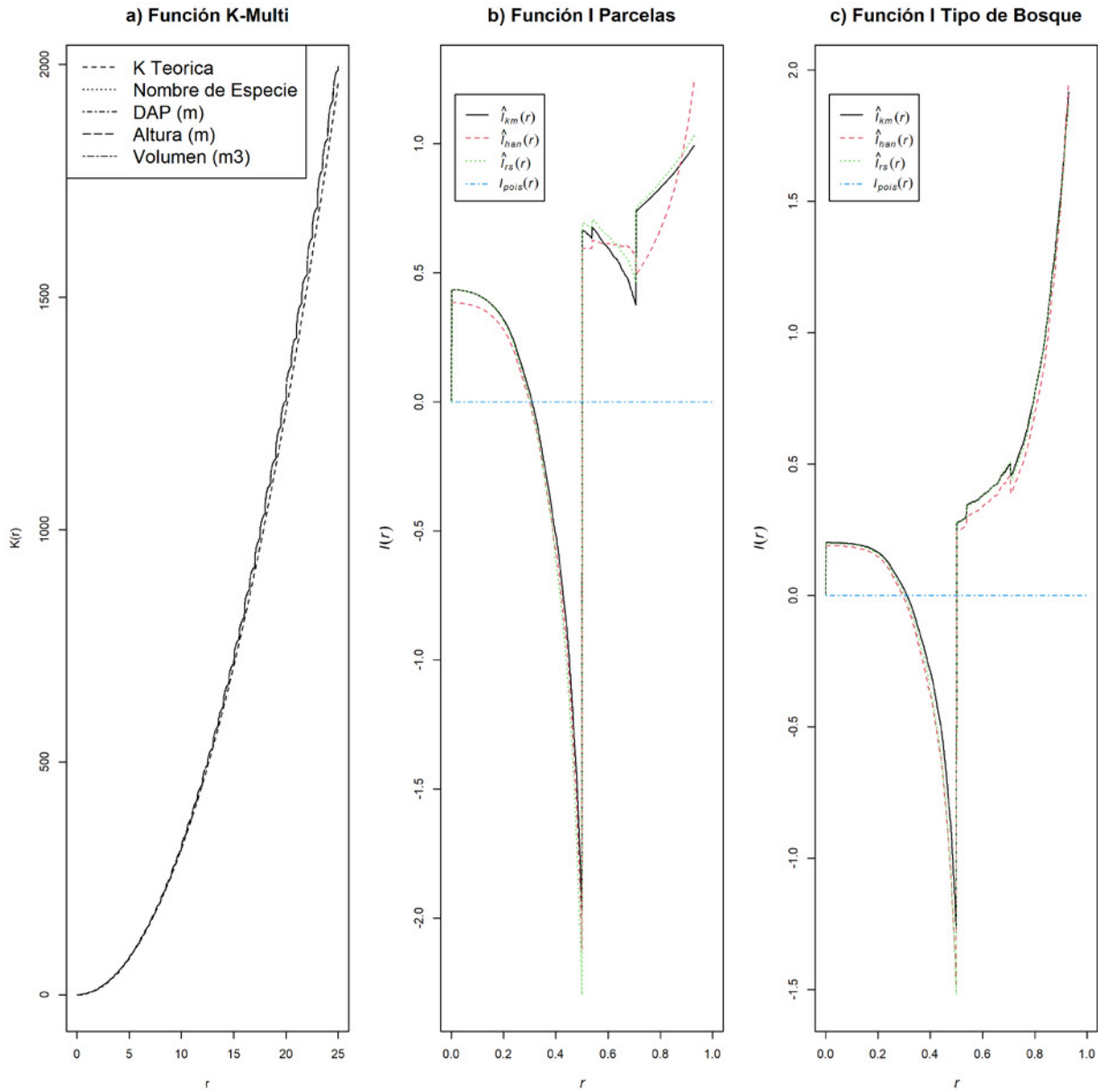
Con base en estos resultados entran en discusión las afirmaciones de Ledo *et al.* (2012), quienes indican que la estructura horizontal en una masa forestal viene determinada –teóricamente– por la distribución en el espacio de los árboles o patrón espacial, donde cada uno de los patrones observados *revela* una historia forestal distinta. En efecto, esta "fotografía" responde a unas causas (Legendre, 1993) y también genera ciertas consecuencias (Halpern y Spies, 1995). Por esta razón, afirmaciones como las de Guariguata y Kattan (2002) y Linares-Palomino (2005) señalan que los patrones de distribución de las especies se ven significativamente afectados a diferentes niveles de perturbación, puesto que estos eventos representan oportunidades de fragmentación en los



**Figura 4.** Función K con marcas, bosque primario y bosque secundario. En parcelas de bosques periurbanos de Mérida, Venezuela.

ecosistemas. De esta manera, en el caso de ecosistemas no intervenidos, los sucesos deberían estar teóricamente aglomerados a mayores niveles; por el contrario, cuando hay aleatoriedad, indican la presencia de intervención. En contraposición, de La Cruz Rot (2006) plantea que la hipótesis nula para la relación entre las plantas adultas debería

ser la independencia, en otras palabras, que si el bosque es maduro se debería tender a un patrón CSR. En el caso de esta investigación el no rechazo de la hipótesis nula indica que no se obtuvo suficiente evidencia para negar dicha hipótesis, por lo tanto, puede afirmarse que se está en presencia de un bosque maduro intervenido.



**Figura 5.** Comparación entre bosque primario y secundario utilizando patrones de puntos multivariantes. Función K-Multivariante (a); Función-I: parcelas (b) y tipo de bosque (c). Bosques periurbanos de Mérida, Venezuela.

Como consecuencia de estas ideas contrapuestas –la caracterización del proceso sin marcas y con marcas de tipo CSR con excepción de la variable especies–, se plantearon las siguientes preguntas: i) ¿el tamaño y forma de las parcelas de trabajo es el idóneo para caracterizar la heterogeneidad ecológica desde un punto de vista espacial?; ii)

con el fin de caracterizar la heterogeneidad ecológica, ¿cómo se podría determinar el tamaño y forma idóneo de las unidades de muestreo desde un contexto espacial? Para responder ambas preguntas se debe partir, al menos de forma exploratoria, del conocimiento sobre la estructura de la covarianza espacial (Skøien y Blöschl, 2006). Por

otra parte, la determinación de la distribución espacial de especies (tanto vegetales como animales) a simple vista puede generar una mala interpretación, dando como consecuencia datos sesgados que conlleven a la aplicación inadecuada de técnicas de manejo y conclusiones erradas (de La Cruz Rot 2008). Al respecto, debe señalarse que Rodríguez (2015) inició dicho proceso exploratorio sin involucrar las coordenadas espaciales de los eventos, sin embargo, con base en los resultados obtenidos acá, puede afirmarse que, desde un contexto exclusivamente espacial, las parcelas son muy pequeñas para caracterizar el proceso. Por ello, una recomendación es identificar dos comunidades de bosques periurbanos (primarios y secundarios) en los cuales se deben levantar los individuos con coordenadas y nuevamente ejecutar las técnicas de patrones puntuales, ya que es posible que el proceso de heterogeneidad ecológica sea significativo a gran escala y, por tanto, deberían diferenciarse, pues en vez de estar trabajando entre individuos, donde los patrones de agregación tienen protagonismo a pequeña escala (Ledo *et al.* 2012), se representarían las dinámicas poblacionales a escala de comunidades vegetales (Hubbell, 1979). Otra posibilidad para discernir el tamaño idóneo del área de trabajo sería definir un patrón de puntos con marcas continuas (semejantes a las que se emplean en la geoestadística), ajustando un modelo exponencial o potencial; ahí se podría concluir que el área es muy pequeña para caracterizar el proceso de autocorrelación espacial (Solana-Gutiérrez y Merino-de-Miguel, 2011), aun cuando debe probarse que existe independencia entre la localización de los puntos de muestreo y el valor de las marcas (de La Cruz Rot 2008). Para el caso de los bosques tropicales, algunos suelen presentar cierta tendencia a la regularidad espacial a escalas grandes, no obstante, según se va reduciendo la escala se suele encontrar una fuerte tendencia a formar agregados (Condit *et al.*, 2000; Lawes *et al.*, 2008; Ledo *et al.* 2009; Picard *et al.*, 2009), por lo que la caracterización del proceso

como CSR es indicativo de intervenciones sobre los bosques periurbanos, ya que es más difícil saber si un bosque es primario cuando no se dispone de un bosque referencial. La escala de análisis o los criterios (estrato, diámetro, tipo funcional) para definir la población que se analiza van a influir de manera decisiva en el patrón espacial resultante, de manera especial en las masas tropicales (Pélissier, 1998), sin embargo, se requiere de un levantamiento exhaustivo de los bosques periurbanos en la ciudad de Mérida con áreas de trabajo de mayor tamaño y su respectivo análisis de distribución espacial, que por razones logísticas no pudo ser realizado en esta investigación. Adicionalmente, el proceso obtenido por la función I es indicativo de una leve competencia entre los individuos a pequeña escala.

## CONCLUSIONES

Se caracterizó el proceso de tipo CSR entre ambas categorías de bosques sin marcas, así como en las variables cuantitativas. En consecuencia, se obtuvo diferencias entre los patrones de puntos marcados de las especies entre bosque primario y secundario, pero no hubo evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula entre la distribución espacial de las parcelas y los tipos de bosque. Una razón posible es que el bosque maduro ha sido sometido a intervenciones de origen antrópico, al tiempo que se presentaban otros factores ambientales como el relieve y la topografía que pueden incidir de manera indirecta en el patrón espacial, pero que no fueron analizadas en esta investigación. Aun así, al no haber ningún modelo estadístico con las variables exógenas espaciales involucradas, la influencia de estos factores en la ocurrencia de los individuos no es totalmente concluyente. No está demás señalar que las unidades de muestreo fueron establecidas en bosques periurbanos con mayor potencial de ser propensos a perturbaciones humanas. Igualmente, es posible



realizar el modelado de las especies con el fin de establecer pronósticos de la ocurrencia de especies e individuos, entre otros, aunque si se desea incluir en el modelo covariables espaciales estas deben ser variables con una gran envergadura espacial. Finalmente, para discernir la estructura ecológica es necesario determinar dos comunidades de bosques periurbanos (uno de bosques primario y otro de secundario) bien diferenciados y efectuar un censo de árboles con coordenadas para ejecutar nuevamente la aproximación de los patrones puntuales, identificando el proceso estadístico y realizando pronósticos.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

J. E. A.G. y L. E. Gámez lideraron la investigación. G. G. R. L. llevó a cabo la investigación de campo. J. E. A.G. y D. V. V.R. analizaron los datos y realizaron la discusión. J. E. A.G. y L. E. G. redactaron el manuscrito. J. E. A.G., L. E. G. y G. G. R. L. comentaron los borradores.

## REFERENCIAS

**Acevedo, M. F.** (2013). *Data analysis and statistics for geography, environmental science, and engineering*. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/b13675>

**Ataroff, M. y Sarmiento, L.** (2004). Las unidades ecológicas de los Andes de Venezuela. En E. La Marca y P. Soriano (Eds.). *Reptiles de los Andes de Venezuela* (pp. 9-26). Fundación Polar/CODEPRE-ULA/Fundacite-Mérida/BIOGEOS.

**Baddeley, A.** (2008). *Analysing spatial point patterns in R* (Versión 3). CSIRO and University of Western Australia.

<http://fisher.stats.uwo.ca/faculty/kulperger/S9934a/Computing/Spatstat-pn0y.pdf>

**Baddeley, A., Rubak, E. y Turner, R.** (2016). *Spatial point patterns. Methodology and applications with R*. CRC Press.

**Baddeley, A., Turner, R., Moller J. y Hazelton, M.** (2010). *Score, pseudo-score and residual diagnostics for spatial point process model*. Aalborg University.

**Bivand, R. S., Pebesma, E. J. y Gómez-Rubio, V.** (2013). *Applied spatial data analysis with R* (Vol. II). Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7618-4>

**Condit, R., Ashton, P. S., Baker, P., Bunyavechewin, S., Gunatilleke, S., Gunatilleke, N., Hubbell, S. P., Foster, R. B., Itoh, A., Lafrankie, J. V., Lee, H. S., Losos, E., Manokaran, N., Sukumar, R. y Yamakura, T.** (2000). Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science*, 288(5470), 1414-1418.  
<https://doi.org/10.1126/science.288.5470.1414>

**Cressie, N.** (1993). *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/9781119115151>

**Dale, M. y Fortin, M-J.** (2014). *Spatial analysis: a guide for ecologists*. Cambridge University Press.

**de la Cruz Rot, M.** (2006). Introducción al análisis de datos mapeados o algunas de las (muchas) cosas que puedo hacer si tengo coordenadas. *Ecosistemas*, 15(3), 19-39.

**de la Cruz Rot, M.** (2008). Métodos para analizar datos puntuales. En F. Maestre, A. Escudero y A. Bonet (Eds.). *Introducción al análisis espacial de datos en ecología y ciencias ambientales: métodos y aplicaciones* (pp. 75-127). Universidad Rey Juan Carlos.

**Diggle, P. J.** (1983). *Statistical analysis of spatial point patterns*. Academic Press.

**Diggle, P. J.** (1986). Displaced amacrine cells in the retina of a rabbit: analysis of a bivariate spatial point pattern. *Journal of Neuroscience Methods*, 18(1-2), 115-125.  
[https://doi.org/10.1016/0165-0270\(86\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0165-0270(86)90115-9)

**Dixon, P. M.** (2002). Ripley's K function. En A. H. El-Shaarawi y W. W. Piergorsch (Eds.). *Encyclopedia of environmental metrics* (pp. 1976-1803). John Wiley & Sons, Inc.

**Douglas, I.** (2005). Peri-urban ecosystems and societies: transitional zones and contrasting values. En D.

- McGregor, D. Simon y D. Thompson (Eds). *The peri-urban interface: approaches to sustainable natural and human resource use* (pp. 18-29). Routledge.
- FAO [Food and Agriculture Organization]**. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010* (Estudio FAO Montes No. 163).  
<http://www.fao.org/3/i1757s/i1757s.pdf>
- FAO [Food and Agriculture Organization]**. (2016). *Guidelines on urban and peri-urban forestry* (FAO Forestry Paper No. 178).  
<http://www.fao.org/3/i6210e/i6210e.pdf>
- Fisher, J. B., Trulio, L. A., Biging, G. S. y Chromczak, D.** (2007). An analysis of spatial clustering and implications for wildlife management: a burrowing owl example. *Environmental Management*, 39, 403-411.  
<https://doi.org/10.1007/s00267-006-0019-y>
- Fox, J.** (2005). The R Commander: a basic statistics graphical user interface to R. *Journal of Statistical Software*, 14(9), 1-42.  
<https://doi.org/10.18637/jss.v014.i09>
- Fox, J.** (2017). *Using the R Commander: a point-and-click interface or R*. CRC Press.
- Fox, J. y Bouchet-Valat, M.** (2018). Rcmdr: R Commander. R package version, 2. 4-4.
- Giraldo, R.** (2009). *Estadística espacial*. Universidad Nacional de Colombia.
- Guariguata, M. R. y Kattan, G. H.** (2002). *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Libro Universitario Regional.
- Halpern, C. B. y Spies, T. A.** (1995). Plant species diversity in natural and managed forests of the Pacific Northwest. *Ecological Applications*, 5(4), 913-934.  
<https://doi.org/10.2307/2269343>
- Harkness, R. D. e Isham, V.** (1983) A bivariate spatial point pattern of ants' nests. *Applied Statistics*, 32(3), 293-303.  
<https://doi.org/10.2307/2347952>
- Hubbell, S. P.** (1979). Tree dispersion, abundance, and diversity in a tropical dry forest. *Science*, 203(4387), 1299-1309.  
<https://doi.org/10.1126/science.203.4387.1299>
- Isaacs, P.** (2011). *Modelo de conectividad espacial empleando sistemas de información geográfica, calidad de hábitat y distribución caso tapir de montaña (Tapirus pinchaque) en el eje cafetero colombiano* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Colombia.  
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/49475>
- Lacaze, B., Dudek, J. y Picard, J.** (2018). Software GRASS GIS con QGIS. En N. Baghdadi, C. Mallet, y M. Zribi (Eds). *QGIS and Generic Tools* (Vol. I) (pp. 67-106). John Wiley & Sons, Inc.  
<https://doi.org/10.1002/9781119457091.ch3>
- Lawes, M. J., Griffiths, M. E., Midgley, J. J., Boudreau, S., Eeley, H. y Chapman, C. A.** (2008). Tree spacing and area of competitive influence do not scale with tree size in an african rain forest. *Journal of Vegetation Science*, 19(5), 729-738.  
<https://doi.org/10.3170/2008-8-18445>
- Ledo, A., Condés, S. y Montes, F.** (2012). Revisión de índices de distribución espacial usados en inventarios forestales y su aplicación en bosques tropicales. *Revista Peruana de Biología*, 19(1), 113-124.  
<https://doi.org/10.15381/rpb.v19i1.799>
- Ledo, A., Montes, F. y Condes, S.** (2009). Species dynamics in a montane cloud forest: identifying factors involved in changes in tree diversity and functional characteristics. *Forest Ecology and Management*, 258, S75-S84.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.055>
- Legendre, P.** (1993). Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? *Ecology*, 74(6), 1659-1673.  
<https://doi.org/10.2307/1939924>
- Legendre, P. y Legendre, L.** (1998). *Numerical ecology*. Elsevier Science.
- Li, F. y Zhang, L.** (2007). Comparison of point pattern analysis methods for classifying the spatial distributions of spruce-fir stands in the north-east USA. *Forestry*, 80(3), 337-349.  
<https://doi.org/10.1093/forestry/cpm010>
- Linares-Palomino, R.** (2005). Patrones de distribución espacial de árboles en un bosque estacionalmente seco del Parque Nacional Cerros de Amotape en el noroeste peruano. *Revista Peruana de Biología*, 12(2), 317-326.  
<https://doi.org/10.15381/rpb.v12i2.2405>
- Lloyd, C.** (2010). *Spatial data analysis. An introduction for GIS users*. Oxford University Press.

- López, H.** (1976). *Hábitos de crecimiento de algunas especies arbóreas y arbustivas de los bosques nublados del estado Mérida, Venezuela* [Tesis de Pregrado inédita]. Universidad de Los Andes.
- Lotwick, H. W. y Silverman, B. W.** (1982). Methods for analysing spatial processes of several types of points. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 44(3), 406-413.
- Montañez Valencia, R. A., Escudero Vásquez, C. Y. y Duque Montoya, A. J.** (2010). Patrones de distribución espacial de especies arbóreas en bosques de alta montaña del departamento de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 63(2), 5629-5638.
- Murrell, D. J. y Law, R.** (2003). Heteromyopia and the spatial coexistence of similar competitors. *Ecology letters*, 6(1), 48-59.  
<https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00397.x>
- Olaya, V.** (2014). *Sistemas de información geográfica*. CreateSpace Independent Publishing Platform.  
<https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Pélissier, R.** (1998). Tree spatial patterns in three contrasting plots of as southern indian tropical moist evergreen forest. *Journal of Tropical Ecology*, 14(1), 1-16.  
<https://doi.org/10.1017/S0266467498000017>
- Penttinen, A. y Stoyan, D.** 2000. Recent applications of point process methods in forestry statistics. *Statist. Sci.*, 15(1), 61-78.  
<https://doi.org/10.1214/ss/1009212674>
- Picard, N., Bar-Hen, A., Mortier, F. y Chadoeuf, J.** (2009). Understanding the dynamics of an undisturbed tropical rain forest from the spatial pattern of trees. *Journal of Ecology*, 97(1), 97-108.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01445.x>
- R Core Team.** (2014). *R: a language and environment for statistical computing* (Versión 4.0.5.) [Software de computador].  
<http://www.R-project.org/>
- Richards, P.** (1983). The three-dimensional structure of tropical rain forest. En S. L. Sutto, T. C. Whitmore y A. C. Cladwasck (Eds). *Tropical rain forest: ecology and management*. John Wiley & Sons, Inc.
- Ripley, B. D.** (1977). Modelling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 39(2), 172-192.  
<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1977.tb01615.x>
- Ripley, B. D.** (1988). *Statistical inference for spatial processes*. Cambridge University Press.
- Rodríguez, G.** (2015). *Estudio de la estructura y composición florística de los bosques periurbanos de la zona norte de la ciudad de Mérida (Venezuela)* [Tesis de Pregrado inédita]. Universidad de Los Andes.
- Rodríguez, J. P., Rojas-Suárez, F. y Giraldo Hernández, D.** (2010). *Libro rojo de los ecosistemas terrestres de Venezuela*. Provita/Shell Venezuela/Lenovo Venezuela.
- Rozas, V. y Camarero, J. J.** (2005). Técnicas de análisis espacial de patrones de puntos aplicadas en ecología forestal. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14(1), 79-97.  
<http://dx.doi.org/10.5424/srf/2005141-00875>
- Skøien, J. O. y Blöschl, G.** (2006). Sampling scale effects in random fields and implications for environmental monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 114(1), 521-552.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-006-4939-z>
- Smith, J., Sabogal, C., De Jong, W. y Kaimowitz, D.** (1997). *Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina* (Occasional Paper No. 13). CIFOR.  
[https://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/OccPapers/OP-13.pdf](https://www.cifor.org/publications/pdf_files/OccPapers/OP-13.pdf)
- Solana-Gutiérrez, J. y Merino-de-Miguel, S.** (2011). A variogram model comparison for predicting forest changes. *Procedia Environmental Sciences*, 7, 383-388.  
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.07.066>
- Stoyan, D. y Stoyan, H.** (1994). *Fractals, random shapes and point fields. Methods of geometrical statistics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Torres, S. y Pérez, J.** (junio, 2008). *La terciarización del monte: vía sostenible acorde con las demandas sociales* [Presentación de paper]. VI Congresso Português de Sociologia, Lisboa, Portugal.  
<http://www.associacaoportuguesasociologia.pt/vi-congresso/pdfs/56.pdf>

**van Lieshout, M. N. M. y Baddeley, A. J.** (1996). A nonparametric measure of spatial interaction in point patterns. *Statistica Neerlandica*, 50(3), 344-361.  
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9574.1996.tb01501.x>

**van Lieshout, M. N. M. y Baddeley, A. J.** (1999). Indices of dependence between types in multivariate point patterns. *Scandinavian Journal of Statistics*, 26(4), 511-532.  
<https://doi.org/10.1111/1467-9469.00165>





## Vegetación leñosa de un remanente de bosque seco tropical en el Caribe colombiano

### Woody vegetation of a tropical dry forest remnant in the Colombian Caribbean

Viviana Londoño-Lemos<sup>1\*</sup>, Juan Tapasco-García<sup>2</sup>,  
Orlando Escobar-Hadechini<sup>1</sup>, Santiago Madriñán<sup>1</sup>

Londoño-Lemos, V., Tapasco-García, J., Escobar-Hadechini, O. y Madriñán, S. (2022). Vegetación leñosa de un remanente de bosque seco tropical en el Caribe colombiano. *Colombia Forestal*, 25(1), 51-66.

**Recepción:** 26 de abril 2021

**Aprobación:** 18 de agosto 2021

#### Resumen

El bosque seco tropical del Jardín Botánico de Cartagena es uno de los pocos remanentes protegidos cerca de esta ciudad. Su estado de conservación y la abundancia de nacimientos de agua en la zona lo hacen único entre los remanentes de este ecosistema en el Caribe colombiano. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la estructura, composición, diversidad funcional y filogenética de la comunidad vegetal del área mediante una parcela permanente. Para ello se registraron 2023 tallos de 62 especies y la familia con mayor Índice de Valor de Importancia (IVI) fue Moraceae. La biomasa aérea total fue de 61.8 t.ha<sup>-1</sup>. Se encontraron dos tipos funcionales de plantas: uno adaptado al sotobosque y otro al dosel, y un bajo agrupamiento filogenético. Se concluyó que el bosque se encuentra en un estado de sucesión secundario intermedio a tardío y que la alta disponibilidad de agua en la zona, además de su ubicación aislada, han sido factores determinantes para su vegetación.

**Palabras clave:** biomasa, composición florística, diversidad filogenética, diversidad funcional, estructura vegetal, rasgos funcionales.

#### Abstract

The Cartagena Botanical Garden tropical dry forest is one of the few protected forest remnants near Cartagena. Its conservation state and the abundance of water sources in the area make it unique among this ecosystem's remnants in the Colombian Caribbean. We evaluated the structure, composition, and the functional and phylogenetic diversity of the plant community by setting up a permanent plot. We recorded 2023 ramets of 62 species. The family with the highest Importance Value Index (IVI) was Moraceae. The total aboveground biomass was 61.8 t.ha<sup>-1</sup>. Two functional types of plants were found: one adapted to the understory, and the other one adapted to the canopy, and a low phylogenetic grouping. We concluded that the forest is in a late to intermediate secondary succession state. The high availability of water in the area and its isolated location have been determining factors for its vegetation.

**Keywords:** biomass, floristic composition, phylogenetic diversity, functional diversity, plant structure, functional traits.

1 Jardín Botánico de Cartagena "Guillermo Piñeres", Turbaco, Colombia.

2 Universidad de los Andes, Colombia.

3 Universidad de los Andes, Colombia.

4 Universidad de los Andes, Colombia.

\* Autor para correspondencia: [vlondon28@gmail.com](mailto:vlondon28@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

El bosque seco tropical (bs-T) es un bioma que agrupa diversos tipos de formaciones vegetales que van desde matorrales xéricos hasta bosques siempreverdes y caducifolios (Pennington *et al.*, 2009). El bs-T se caracteriza por presentar una marcada estacionalidad, con 3 a 8 meses de sequía, una o dos épocas de lluvia al año y un rango de precipitación anual entre 250 y 2000 mm (Gentry, 1995; Murphy y Lugo, 1986). Esta estacionalidad supone la aparición de adaptaciones especiales de las plantas como respuesta al déficit hídrico, lo que significa altas tasas de endemismo y diversidad beta (DRYFLOR *et al.*, 2016; Pizano *et al.*, 2014). La mayoría de los bs-T son estructuralmente menos complejos que los bosques húmedos tropicales, presentando menores valores de altura, área basal, biomasa y riqueza de especies; esto puede deberse a factores como el estado de conservación de los bosques, el clima y el tipo de suelo (Maia *et al.*, 2020; Murphy y Lugo, 1986), y a la presencia de un sotobosque con mayor densidad de arbustos y abundancia de lianas (Gentry, 1995). En cuanto a su composición, el bs-T se caracteriza por la dominancia general de Fabaceae en el estrato arbóreo y de Bignoniaceae para las lianas (Gentry, 1995; Murphy y Lugo, 1986).

A nivel mundial Sudamérica concentra el 54 % de los bs-T (Miles *et al.*, 2006) y, en particular, para el caso de Colombia, son seis las agrupaciones de bs-T que se presentan de acuerdo con la variabilidad ambiental y la composición florística (González-M *et al.*, 2018), de las cuales la región Caribe es la que contiene los fragmentos de mayor extensión (DRYFLOR *et al.*, 2016; Pizano *et al.*, 2016). Actualmente, menos del 8 % del tamaño original de bs-T en Colombia se mantiene, y sólo el 5 % del área remanente se encuentra protegida (Pizano *et al.*, 2014). Los ecosistemas secos se encuentran entre los más vulnerables a nivel global y, en los trópicos, el bs-T es de los más amenazados (FAO, 2019; Miles *et al.*, 2006;

Pizano *et al.*, 2014; Sánchez-Azofeifa *et al.*, 2003). En este contexto, durante la última década diversas investigaciones han evaluado el estado de comunidades vegetales de bs-T en distintas etapas de sucesión en el país (DRYFLOR *et al.*, 2016; Pizano *et al.*, 2014; Polania Cleves, 2019; Ruiz Linares y Fandiño Orozco, 2009), pero a pesar de estas contribuciones varios estudios han señalado la importancia de continuar generando información sobre el bs-T en Colombia e implementando estudios a largo plazo, particularmente en la región Caribe (Álvarez *et al.*, 2012; Miles *et al.*, 2006).

Entre los remanentes de bs-T cercanos a la ciudad de Cartagena, una de las más importantes y con mayor desarrollo urbano del Caribe colombiano, se encuentra el bosque que protege el Jardín Botánico “Guillermo Piñeres” (JBGP). Este remanente aislado está rodeado por una matriz rural intervenida, alejado por lo menos 5 km a la redonda de otros fragmentos de tamaño similar (entre 1 a 10 ha). Es debido al estado de fragmentación del bs-T en esta zona que esta área se ha convertido en un refugio para la fauna y flora nativas. Otra de sus características únicas es que, pese a que presenta la estacionalidad usual del ecosistema, la disponibilidad de agua es alta a lo largo del año, pues existen varios acuíferos y nacimientos pertenecientes a la cuenca del arroyo Matute, uno de los afluentes más importantes de Cartagena (Botero Pareja *et al.*, 2008). Cabe señalar que el fragmento no ha sido intervenido desde 1972 cuando se construyó un sendero peatonal, por lo cual su vegetación cuenta con casi 50 años de recuperación.

Por todo lo anterior, en este estudio se evaluó la comunidad vegetal leñosa del bs-T perteneciente al JBGP mediante la determinación de su estructura, composición florística y diversidad funcional y filogenética. Además, se sentó una base para su monitoreo gracias a la construcción de una parcela permanente de 1 ha con el objetivo de continuar generando conocimientos sobre la vegetación de los fragmentos aislados de bs-T en matrices altamente intervenidas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El JGBP (10° 21' 16" N, 75° 25' 40" W) se localiza a 5 km de Cartagena y está bajo la jurisdicción del municipio de Turbaco (Bolívar, Colombia). El remanente de bs-T que protege cuenta con una extensión de 3 ha, su altitud oscila entre los 167 m y 190 m, y la zona recibe en promedio 1238 mm de precipitación anuales, con una estación seca que va desde diciembre hasta marzo y en la que caen menos de 50 mm mensuales. La temperatura promedio anual es de 28 °C (mediciones del JGBP).

### Establecimiento y censo de la parcela

La parcela permanente fue construida y censada siguiendo los protocolos descritos en [Vallejo-Joyas et al. \(2005\)](#); esta constaba de 1 ha dividida en 25 cuadrantes de 20 m x 20 m. La delimitación de los cuadrantes y de la parcela fue realizada con un hipsómetro TruPulse 360 R de Laser Technology. Se marcaron todos los tallos de individuos leñosos con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor o igual a 2.5 cm y a cada tallo le fue asignada una placa con un código alfanumérico para su posterior censo, ubicada a una altura de 1.8 m.

De cada uno de los tallos censados se registró la especie, el DAP, la altura total y su ubicación midiendo con un decámetro la distancia a los ejes de cada cuadrante (con precisión de 10 cm). Además, se reunieron muestras de cada especie para su identificación, depositadas en el herbario del JGBP con el nombre del proyecto: "Parcela Permanente JGBP 2020" y colectadas bajo el permiso del Marco de Recolección de la [Resolución No. 000571 de 2015](#).

### Composición y estructura florística

Se calcularon los índices de diversidad de Shannon ( $H'$ ) y la exponencial de Shannon ( $e^H$ ) y Simpson ( $1 - D$ ) ([Jost, 2007](#)). Así mismo, se realizó un

análisis de similitud ANOSIM para saber si existían diferencias de composición florística entre los cuadrantes de la parcela. Estos análisis fueron realizados con el software PAST, versión 4.0.2. ([Hammer et al., 2001](#)). En cuanto al estudio de la estructura del bosque, se calculó el área basal y se determinaron los valores de frecuencia, abundancia y dominancia relativas para el cálculo del índice de valor de importancia (IVI) por especie.

### Diversidad funcional

Se seleccionaron las especies cuya abundancia relativa acumulada en la parcela sumara aproximadamente el 80 % para la medición de los rasgos funcionales. De cada especie se escogieron 10 individuos de altura superior a la media por especie y de cada uno se colectaron 6 hojas que estuvieran expuestas al sol ([Pérez-Harguindeguy et al., 2013](#)). A continuación, se midieron 4 tipos de rasgos: generales, foliares, del tallo y regenerativos ([Tabla 1](#)). Luego, a partir de los datos de rasgos por especie, se calcularon los índices de diversidad funcional, utilizando la media ponderada por comunidad y estandarizando los datos para equilibrar sus varianzas. Cabe mencionar que el análisis de la diversidad funcional se realizó en el programa FDiversity, versión 2014 ([Casanoves et al., 2010](#)). Los Índices calculados fueron el rRao (rao relativo), como un medidor relativo de la diversidad general, y los índices funcionales Fric (riqueza funcional, el espacio funcional ocupado por la comunidad), Feve (igualdad funcional, la regularidad de la distribución de las abundancias de las especies en el espacio funcional), Fdiv (divergencia funcional, la divergencia de las abundancias de las especies al centroide del espacio funcional), Fdis (dispersión funcional, distancia promedio de cada especie y sus rasgos al centroide) y Fspe (especialización funcional, el promedio de la especialización de las especies dentro de la comunidad) ([Casanoves et al., 2010](#); [Casanoves et al., 2011](#); [Villéger et al., 2010](#)).

Posteriormente, se llevó a cabo un dendrograma con el método de análisis jerárquico de Ward y distancias euclidianas para caracterizar los tipos funcionales de las especies más importantes. En seguida, se aplicó un análisis PERMANOVA, debido a que los datos no se distribuían normalmente, para evaluar la significancia de la diferencia entre estos grupos funcionales. Y, finalmente, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para observar la separación entre los grupos y los caracteres que mayormente incidían en la separación observada.

## Biomasa

Los valores de densidad de madera para el cálculo de biomasa se obtuvieron del *Global Wood Density Database* (Zanne *et al.*, 2009), a excepción de *Sabal mauritiiformis*, cuyo valor se obtuvo de Álvarez *et al.* (2013). En el caso de especies de lianas de las que no se encontró información, se adoptó un valor estándar de 0.4 g.cm<sup>-3</sup> (Putz, 1990). Utilizando dos ecuaciones alométricas, se

calculó la biomasa aérea para lianas (Schnitzer *et al.*, 2006) y árboles (Chave *et al.*, 2014). Se escogieron estas ecuaciones dada su robustez a lo largo de distintos ecosistemas boscosos y condiciones bioclimáticas, y en el caso de las lianas, debido a su aplicabilidad a los diversos tipos de lianas encontrados en el bosque.

## Diversidad filogenética

Se construyó una filogenia de todas las especies de la parcela utilizando el programa web Phylomatic 3.0, basado en la base de datos del sistema de clasificación APG III (Webb y Donoghue, 2005). El árbol resultante fue convertido a ultramétrico, donde todas las ramas tienen la misma distancia al origen y se asume la presencia de reloj molecular evolutivo, lo que permite calcular con mayor facilidad las distancias filogenéticas de las especies en la comunidad. Se utilizó, además, el programa FDiversity para calcular los índices PSV (*phylogenetic species variability* o *variabilidad filogenética*, definida como la cercanía filogenética entre las especies), PSR

**Tabla 1.** Tipos de rasgos funcionales medidos para las especies que representan el 80 % de la abundancia relativa acumulada

Tipo de rasgo	Rasgo	Descripción	Metodología
General	Altura máxima (m)	Altura total del individuo de mayor altura por especie	Datos del censo de la vegetación
	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Área de la hoja y el peciolo	Colecta de 6 hojas por individuo en 10 individuos, área medida en software ImageJ (Abràmoff <i>et al.</i> , 2004)
Foliar	Área foliar específica (cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	Relación entre área foliar y masa seca	La masa seca corresponde al peso de las hojas después de permanecer durante 7 días en un horno a 60 °C
Tallo	Densidad de madera	Relación entre la masa seca y el volumen fresco de la madera (g.cm <sup>-3</sup> )	Consulta de fuentes bibliográficas: todas las de Zanne <i>et al.</i> , 2009, excepto <i>Sabal mauritiiformis</i> , analizada por Álvarez <i>et al.</i> (2013)
	Semillas por fruto	Número de semillas por fruto	Promedio de número de semillas por fruto dependiendo de la disponibilidad de individuos y fuentes bibliográficas
Regenerativos	Masa de semillas	Peso seco de las semillas (g)	Peso de las semillas después del secado en horno. Las semillas grandes fueron trituradas. Para algunas especies se consultaron las siguientes fuentes bibliográficas: Cedeño <i>et al.</i> , 2010; Faicán Ortiz e Intriago Méndez, 2019; Francis y Rodríguez, 1993; Gerhardt, 1993; Royal Botanical Gardens Kew, 2021



(*phylogenetic species richness*, entendida como el número de especies o “grupos” de la comunidad teniendo en cuenta su cercanía filogenética), PSE (*phylogenetic species evenness*, que es la variabilidad de las especies –al igual que el PSV–, pero este índice considera la abundancia de las especies) y PSC (*phylogenetic species clustering o agrupamiento filogenético de especies*, una métrica que precisa cómo se agrupan las puntas de las ramas del árbol filogenético) (Helmus et al., 2007).

## RESULTADOS

### Composición y estructura

Los datos de las mediciones de la parcela pueden ser consultados a través de los portales de SiB Colombia y GBIF (Londoño-Lemos et al., 2020). Allí, fueron registrados 2023 tallos agrupados en 1602 individuos pertenecientes a 62 especies distribuidas en 34 familias (Anexo 1). El 85 % de los individuos fueron árboles y arbustos, el 11 % lianas y el 4 % palmas. Las especies más abundantes, tanto en número de individuos como de tallos, fueron *Brosimum alicastrum* (14 % y 17 %, respectivamente), seguida de *Trophis racemosa* (13 % y 17 %) y *Capparidastrium frondosum* (9 % y 11 %). *Urera baccifera* ocupó el cuarto lugar en número de tallos (9 %) y *Mammea americana* ocupó el cuarto lugar en número de individuos (8 %). En cuanto a los índices de diversidad  $H'$  y  $e^{(H')}$ , estos sugieren una dominancia por parte de las especies más importantes del bosque con sus respectivos valores de 2.884 y 17.886. Por su parte, el índice de Simpson tuvo un valor de 0.911. La familia con mayor riqueza de especies fue Sapindaceae, con cuatro, seguida de Apocynaceae, Araceae, Fabaceae, Meliaceae, Moraceae, Nyctaginaceae y Urticaceae, cada una con tres. Para el resto de las familias (12) se registraron 1 o 2 especies. El ANOSIM no sugirió diferencias significativas entre los cuadrantes de las parcelas ( $p = 0.0565$ ,  $R = 0.0291$ ), por lo que las especies dentro del bosque tienen una

distribución aleatoria dentro de la parcela. Respecto al área basal total para la parcela, esta fue de 20.9 m<sup>2</sup>.ha y las especies que más aportaron fueron *Guarea guidonia* (21 %), *Ficus maxima* (13 %), *Trophis racemosa* (12 %) y *Sabal mauritiiformis* (10 %). El aporte de las lianas al área basal fue de 4.01 m<sup>2</sup>.ha y las familias con mayor IVI acumulado fueron Moraceae, Capparaceae y Meliaceae, respectivamente. A nivel de especie, las que presentaron mayor IVI fueron *Trophis racemosa* (109 %, Moraceae) y *Brosimum alicastrum* (94 %, Moraceae), seguidas de *Capparidastrium frondosum* (70 %, Capparaceae) y *Guarea guidonia* (60 %, Meliaceae). Para el caso de las lianas se registraron 13 especies, de las cuales la más abundante fue la Bignoniaceae *Martinella obovata* (42 % IVI, 100 individuos). Es preciso señalar que todas las especies de Bignoniaceae registradas fueron lianas y que el resto de las especies de lianas no contó con un IVI significativo, dada su distribución localizada (Anexo 1).

### Biomasa

Todos los cálculos de biomasa se realizaron con un n de 2023 tallos, dando como resultado una biomasa aérea total de 61.8 t.ha<sup>-1</sup>. Las especies con mayor aporte de biomasa aérea fueron *Guarea guidonia* (25 %), *Ficus maxima* (12 %), *Trophis racemosa* (11 %) y *Sabal mauritiiformis* (8 %). Al analizar la distribución de la biomasa aérea entre las clases diamétricas, los individuos con DAP mayor a 30 cm concentraron el 55 % (31.0 t.ha<sup>-1</sup>). En cuanto a la distribución de la biomasa aérea por altura, los tallos con altura superior a los 14 m concentraron el 61 %. Así mismo, las lianas aportaron 6.6 t.ha<sup>-1</sup> a la biomasa aérea total.

### Diversidad funcional

Las especies que sumaron el 80 % (12) de la abundancia relativa acumulada junto con los valores de cada rasgo por especie se resumen en la Tabla 2. Para calcular cada índice se utilizaron 6 hojas de

10 individuos de cada especie, exceptuando la palma *Sabal mauritiiformis* para la cual, debido a la dificultad de colecta de sus hojas, los datos corresponden a 2 hojas por individuo en 5 individuos. Respecto a los datos no foliares, se utilizó la información recolectada a través de la bibliografía. Los siguientes fueron los valores obtenidos para los índices de diversidad funcional:  $rRao = 0.4148$ ,  $FRic = 0.17011$ ,  $FEve = 0.5628$ ,  $FDiv = 0.7052$ ,  $FDis = 1.798$  y  $FSp = 2.2272$ .

Con base al dendrograma obtenido se aprecian dos grupos funcionales distintos que presentan diferencias significativas según el PERMANOVA ( $p = 0.0018$ ). Debido a que al excluir las especies con hábitos de crecimiento disímil (palma *Sabal mauritiiformis* y liana *Martinella obovata*) las diferencias significativas se mantienen ( $p = 0.0033$ ,

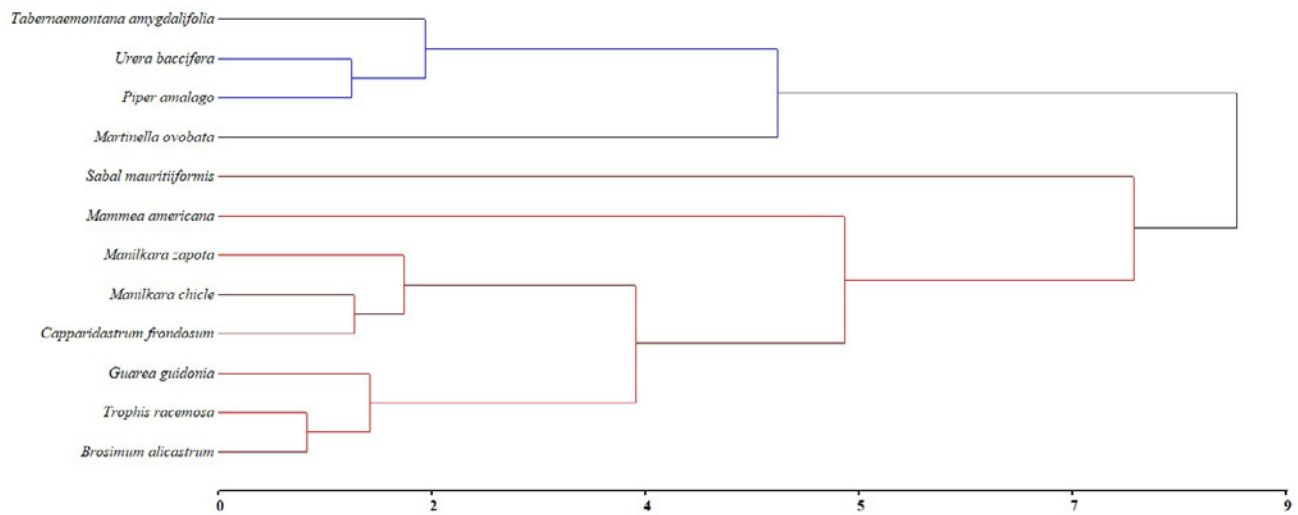
$n = 12$ ), se utilizaron todas las especies seleccionadas para los análisis. En este sentido, se obtuvo un grupo de especies arbóreas y una palma conformado por *Trophis racemosa*, *Brosimum alicastrum*, *Guarea guidonia*, *Capparidastrium frondosum*, *Manilkara zapota*, *Manilkara chicle*, *Mammea americana* y *Sabal mauritiiformis*, caracterizadas por tener una altura máxima que supera el dosel, alta densidad de madera y baja proporción de área específica foliar (Figura 1 y Figura 2). En contraste, el otro grupo se compone de arbustos y una liana, conformado por las especies *Tabernaemontana amygdalifolia*, *Piper amalago*, *Urera baccifera* y *Martinella obovata*, que se identifican por tener baja densidad de madera, bajos valores de altura máxima, muy alta

**Tabla 2.** Rasgos funcionales evaluados de las 12 especies que representaron el 80 % de la abundancia relativa acumulada, donde: AM = Altura máxima, AF = Área foliar, AFE = Área foliar específica, D = densidad. Los valores medidos representan promedios y se indica la desviación estándar

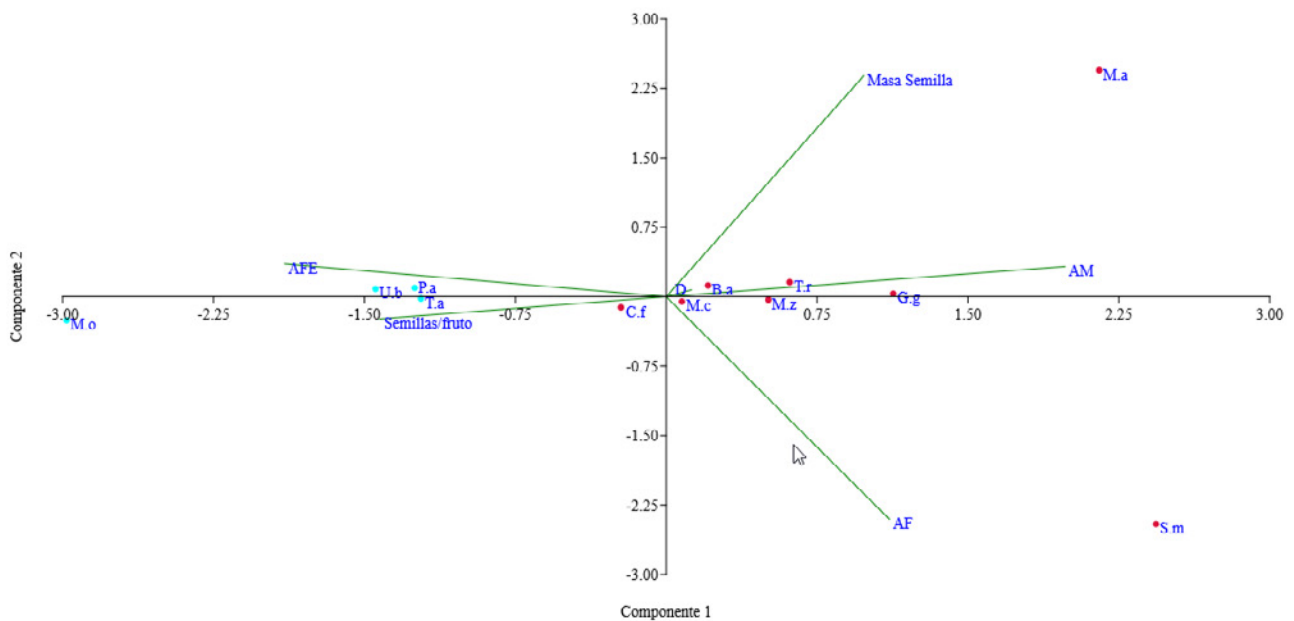
Especie	Tipo de rasgo					
	General	Foliar	Tallo		Regenerativos	
	AM (m)	AF (cm <sup>2</sup> )	AFE (cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	D (g.cm <sup>-3</sup> )	Semillas por fruto	Masa semillas (g)
<i>Brosimum alicastrum</i>	14.5	52.4±25.2	16.8±6.5	0.599±0.109	1±0	1.000±0.3
<i>Capparidastrium frondosum</i> +	6.9	73.6±35.6	11.7±1.8	0.691±0.094	7±3	0.097±0.00
<i>Guarea guidonia</i> +	24.0	1682.5±986.3	13.2±6.5	0.543±0.091	3±1	0.198±0.00
<i>Mammea americana</i> +	20.3	102.7±31.6	7.9±1.6	0.64±0.028	2±1	44.000± 13.68
<i>Manilkara chicle</i> +	10.1	152.6±44.3	11.4±3.5	1.04±0.000	6±2	0.290±0.07
<i>Manilkara zapota</i>	14.1	33.3±15.4	9.2±1.1	0.81±0.000	6±1	0.216±0.001
<i>Martinella obovata</i>	NA	115.9±74.0	28.1±22.4	0.578±0.032	55±27	0.047±0.001
<i>Piper amalago</i> +	5.9	55.8±14.4	29.3±6.9	0.394±0.089	1±0	0.001±0.002
<i>Sabal mauritiiformis</i> *	18.5	35296.2±5642.0	3.7±1.1	0.497±0.027	1±0	0.300±0.001
<i>Tabernaemontana amygdalifolia</i>	5.6	36.1±16.3	23.6±5.4	0.524±0.103	12±9	0.027±0.001
<i>Trophis racemosa</i>	19.7	48.1±21.1	16.5±4.4	0.659±0.111	1±0	0.500±0.001
<i>Urera baccifera</i> +	5.0	289.7±92.6	31.4±11.0	0.165±0.000	1±0	0.07±0.02

**Nota:** \* Los valores de *Sabal mauritiiformis* para AFE y AF corresponden a muestras de dos hojas por individuo en cinco individuos; esto se debe a la dificultad de colectar una hoja completa sin causar daño. El valor de densidad fue obtenido de Álvarez et al. (2013).

+ Datos de semillas obtenidos de fuentes bibliográficas.



**Figura 1.** Dendrograma creado con el método de Ward y distancias euclidianas, basado en las especies que representan el 80 % de la abundancia relativa acumulada de la parcela. Se observan dos grupos funcionales: árboles/palma (rojo), arbusto/liana (azul).



**Figura 2.** Análisis de componentes PCA de los grupos funcionales de la parcela.

B.a = *Brosimum alicastrum*, C.f = *Capparidastrum frondosum*, G.g = *Guarea guidonia*, M.a = *Mammea americana*, M.c = *Manilkara chicle*, M.o = *Martinella obovata*, M.z = *Manilkara zapota*, P.a = *Piper amalago*, S.m = *Sabal mauritiiformis*, T.a = *Tabernaemontana amygdalifolia*, T.r = *Tropheis racemosa*, U.b = *Ureva baccifera*.

proporción de área foliar específica, y por habitar zonas abiertas o de sotobosque.

### Diversidad filogenética

Al realizar el análisis de la diversidad filogenética de la comunidad vegetal que alberga el bs-T del JBG (todos los cuadrantes  $n = 25$ ), el valor de PSV encontrado (0.67) indicó que las especies registradas están poco relacionadas filogenéticamente entre sí. Por su parte, el valor de PSR mostró una riqueza filogenética de 8.37, el PSE presentó un valor medio de 0.58 y el PSC un valor bajo (0.38).

## DISCUSIÓN

Para empezar, la riqueza de especies presentes en el bs-T del JBG (62) se encuentra dentro del rango reportado (55 a 155 especies) para otros bs-T en el Caribe colombiano (Marulanda *et al.*, 2003; Mendoza-C., 1999). El índice de diversidad de Shannon  $H'$  refleja valores cercanos a 3, lo que indica una alta diversidad, mientras que la exponencial de Shannon  $e^{H'}$  muestra que la cantidad efectiva de especies es mucho menor a la riqueza de la parcela. A su vez, el índice de diversidad de Simpson (1-D) sugiere una baja dominancia y una alta diversidad, aunque el resultado del valor del índice de diversidad de Simpson difiere de lo observado dada la dominancia de dos especies en la parcela. Tal es el caso de la alta abundancia de individuos de Moraceae: *Brosimum alicastrum* y *Trophis racemosa*, especies perennifolias y comunes en otros bs-T del Caribe colombiano (Herazo Vitola *et al.*, 2017). Al respecto, se encontró que casi la totalidad de sus individuos son árboles juveniles que crecen en el sotobosque, con *Brosimum alicastrum* y *Trophis racemosa* exponiendo en el 92 % y el 70 % de sus individuos, respectivamente, un DAP menor de 10 cm. Por otra parte, sólo el 6 % de los individuos de *Brosimum alicastrum* y el 24 % de *Trophis racemosa* alcanzan el dosel.

En cuanto a la riqueza de especies, la familia Sapindaceae presentó la mayor cantidad, con cuatro: los árboles *Sapindus saponaria*, *Melicoccus bijugatus* y *Melicoccus oliviformis*, y la liana *Paullinia* sp. Si bien esta familia es una de las dominantes en los bs-T (Gentry, 1995), en el bosque del JBG está representada por unos pocos individuos aislados (6 en total). Así pues, los valores de abundancia de lianas (11 % del total de individuos registrados) son similares a los de otros bs-T del Caribe colombiano, los cuales se encuentran entre el 5 % y el 20 % del total de individuos (Marulanda *et al.*, 2003; Polania Cleves, 2019); también se encontró este mismo patrón de diversidad para Bignoniaceae, que la señala como la familia más representativa entre las lianas (Gentry, 1995).

Ahora bien, pese a que las familias registradas para el bosque del JBG hacen parte de la composición característica de los bs-T, uno de los hallazgos más interesantes fue la poca representatividad de Fabaceae, de la cual se registraron tres especies (dos lianas y un árbol), con un total de siete individuos y un IVI acumulado de 6 %, lo que contrasta con la dominancia constante de esta familia en el estrato arbóreo del bs-T en el neotrópico (Gentry, 1995; Mendoza-C., 1999; Pizano *et al.*, 2014; Vargas *et al.*, 2015). Es necesario señalar que un posible factor determinante en la composición del bosque del JBG es la dispersión de semillas por vertebrados. Esto se hace notorio en el predominio de especies productoras de frutos carnosos en todos los estratos del bosque y concuerda con la abundancia de fauna silvestre observada en la zona durante el censo (Janzen, 1988). En este sentido, la poca representatividad de Fabaceae puede ser consecuencia de la ausencia de dispersores efectivos de semillas. En el caso de *Alouatta seniculus* y *Saguinus oedipus* (mono aullador y mono tití cabeciblanco, especies que habitan en el JBG), se ha reportado que el principal recurso alimenticio extraído de Fabaceae es la savia y las hojas (Ávila Molina y Padilla Rivera, 2005; García Castillo, 2016). Así mismo, se ha constatado la ausencia de lluvia de semillas de esta familia en fragmentos de bs-T del Caribe colombiano, en donde los principales

dispersores son aves y murciélagos (León Barbosa, 2010). Por otro lado, la presencia de individuos de especies cultivadas de uso ornamental o frutal dentro de la parcela, como *Manilkara zapota*, *Mammea americana*, *Roystonea regia* y *Adonidia merrillii*, puede deberse a la dispersión de sus frutos por parte de los mamíferos en el área en que se alimentan de ellas (el argumento anterior proviene de observaciones en campo durante los censos).

Respecto al valor obtenido de biomasa aérea total, la parcela JBGP (con 61.8 t.ha<sup>-1</sup>) está dentro del rango de los valores obtenidos (35 t.ha<sup>-1</sup> a 88 t.ha<sup>-1</sup>) para otras parcelas de bs-T localizadas en fragmentos de estado intermedio a tardío de sucesión en Colombia (Polanía Cleves, 2019; Torres et al., 2012). En este sentido, al analizar la biomasa por especies, se encontró que *Guarea guidonia* aportó la mayor biomasa aérea, lo que está relacionado con el gran tamaño de los individuos de esta especie, pues presenta menos de un cuarto de la cantidad de individuos de *Trophis racemosa* o *Brosimum alicastrum* (64 individuos contra 270 individuos). Así pues, el 50 % de los individuos de *Guarea guidonia* alcanzan el dosel, el 25 % son árboles emergentes (altura mayor a 14 m, con un máximo de 24 m) y el 20 % de los tallos presentan un DAP mayor a 30 cm.

Sobre los índices de diversidad funcional, estos sugieren que para los rasgos escogidos no hay alta divergencia entre las especies y, por ende, tampoco a nivel de la comunidad. El valor del índice rRao indica, por tanto, que la comunidad es menos de la mitad de diversa de lo que podría ser en cuanto a caracteres funcionales (42 %), lo que soporta la idea de homogeneidad en ella. El índice FEve muestra también que la comunidad es bastante parecida, y que solo aproximadamente el 30 % de las especies cuentan con un rasgo diferente. En consecuencia, los dos tipos funcionales encontrados se caracterizan principalmente por tres rasgos: la altura máxima y la densidad de la madera, relacionadas con la forma de crecimiento, y el área foliar específica, relacionada con el costo de producción de la superficie foliar. Aun así, si bien los valores

de los índices de diversidad funcional muestran que no existen grandes diferencias entre los tipos funcionales, es notable la agrupación de las especies arbóreas con la palma *Sabal mauritiiformis* en un ensamblaje funcional con mayor densidad de madera y baja área foliar específica.

Cabe resaltar que las especies seleccionadas para el análisis funcional se caracterizaron por presentar follaje perenne de hojas simples, dispersión por animales y fructificación no estacional, características que contrastan con los patrones generales reportados para los bs-T, donde son más comunes las especies caducifolias, de hojas compuestas, dispersión anemócora y, en general, una fenología determinada por la estacionalidad en las lluvias (Murphy y Lugo, 1986; Pizano et al., 2014). En relación con esto, existen estudios que muestran que al aumentar la disponibilidad de agua los patrones fenológicos tienden a ser menos estacionales (Borchert, 1994). Lo anterior sugiere que para las especies del bosque del JBGP la abundancia de acuíferos y de corrientes de agua en la zona puede ser un factor importante que afecta la fenología y la estructura observadas. Además, adicional a la presencia de acuíferos, el nivel de degradación actual que se observa en zonas aledañas también puede ser un factor a evaluar a futuro con el objetivo de entender su influencia en la composición y estructura observadas (Janzen, 1988; Miles et al., 2006).

Finalmente, acerca de la diversidad filogenética existe un bajo agrupamiento en las especies del bosque que difiere de los dos grupos encontrados con base a los rasgos funcionales. Por un lado, el PSV indica que las especies no están muy relacionadas entre sí, lo cual se ve reflejado en la dispersión de las familias de las especies a lo largo del árbol filogenético de las Angiospermas. Por otro lado, el PSR sugiere que hay un aproximado de ocho grupos filogenéticos que comparten características similares. De ahí que al añadir el ponderador de abundancia al PSV se obtenga el valor del PSE, lo que sugiere una alta variabilidad en la abundancia de las especies. Esto se relaciona con la dominancia antes mencionada de *Brosimum*

*alicastrum* y *Trophis racemosa*. Por su parte, el PSC sugiere un agrupamiento alto en las puntas de las ramas del dendrograma, indicando así que la mayoría de las familias examinadas se encuentran en los mismos grupos y que en algunos casos se registraron especies muy cercanas dentro de un mismo género o en géneros hermanos.

## CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta su composición y estructura, el bs-T que alberga el JBGP se encuentra en un estado de sucesión secundario intermedio a tardío. La baja representatividad de Fabaceae en este remanente es inusual en el bs-T, lo cual puede deberse a su aislamiento frente a otros relictos de bs-T, limitando así la dispersión de semillas. A su vez, su papel como refugio de fauna en la zona parece reforzar el dominio de especies dispersadas por vertebrados y su localización en un sitio con alta disponibilidad de agua promueve el asentamiento de especies no estacionales. Pese esto, conserva muchas características del bs-T.

En general, la vegetación del bosque del JBGP parece estar más determinada por su diversidad funcional debido a la diferencia entre los grupos funcionales encontrados y a la baja dominancia observada en cuanto a composición –que se corresponde con la diversidad filogenética–. Es necesario, entonces, continuar con el estudio de otros fragmentos aislados en esta región, ya que estos aportan información sobre el impacto de degradación actual del bs-T caribeño. Los monitoreos y estudios sobre su dinámica ecológica permitirán futuras investigaciones sobre las relaciones de competencia y el establecimiento de nuevas especies en la zona.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación para la Promoción de la Investigación y la Tecnología del

Banco de la República (FPIT) y al JBGP por la financiación recibida para este proyecto. También a todo el personal del herbario y el vivero del JBGP por su ayuda y apoyo. Adicionalmente, a los dos evaluadores anónimos que con sus aportes enriquecieron el contenido del presente artículo.

## CONTRIBUCIONES POR AUTOR

V. L.L., J. T.G. y S. M. idearon la investigación y escribieron el proyecto y la metodología. J. T.G. y O. E.H. realizaron la toma de datos en campo y el análisis preliminar de los datos. V. L.L., J. T.G. y O. E.H. escribieron la versión inicial del artículo. Todos los autores realizaron la edición final del texto y contribuyeron en su discusión y conclusiones.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## REFERENCIAS

- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J. y Ram, S. J.** (2004). Image Processing with ImageJ. *Biophotonics International*, 11(7), 36-42.
- Álvarez, E., Benítez, D., Velásquez, C. y Cogollo, Á.** (2013). Densidad básica del fuste de árboles del bosque seco en la costa Caribe de Colombia. *Intropica*, 8(1), 17-28.
- Álvarez, E., Mendoza, I., Pacheco, M., Restrepo, Z., Benítez, D., Gutiérrez, T. D., Ramírez, O. C., Dib, J. C., Roldán, A., Carbone, E., Zarza, E., Velásquez, L. A., Serna, M., Velásquez, C., Álvarez, Y., Jiménez, O., Martínez, M., Idárraga, A. y Gómez, F.** (2012). ¿Por qué implementar estudios de largo plazo en el bosque seco del Caribe colombiano? *Intropica*, 7(1), 97-113.
- Ávila Molina, F. y Padilla Rivera, O.** (2005). *Variación estacional del uso de recursos alimenticios del mono aullador *Alouatta seniculus* (L. 1766) en un*

- fragmento de bosque seco tropical (*bs-T*) en el norte del departamento del Atlántico, Colombia [Trabajo de grado, Universidad del Atlántico]. [https://www.researchgate.net/profile/Orlando-Rivera-6/publication/330114331\\_Alouatta\\_seniculus-BsT-edited/links/5c2e28c8458515a4c70a5339/Alouatta-seniculus-BsT-edited.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Orlando-Rivera-6/publication/330114331_Alouatta_seniculus-BsT-edited/links/5c2e28c8458515a4c70a5339/Alouatta-seniculus-BsT-edited.pdf)
- Borchert, R.** (1994). Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. *Ecology*, 75(5), 1437-1449. <https://doi.org/10.2307/1937467>
- Botero Pareja, C. E., Guardo Castaño, L. G., Nieto Parra, G. y Castaño Rodríguez, G. F.** (2008). *Caracterización hidrológica de la cuenca del arroyo Matute como el elemento para considerar un posible ordenamiento territorial* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio institucional de la Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB). <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/1501>
- Casanoves, F., Pla, L., Di Rienzo, J. A. y Díaz, S.** (2010). FDiversity: a software package for the integrated analysis of functional diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 2(3), 233-237. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00082.x>
- Casanoves, F., Pla, L. y Di Rienzo, J. A.** (2011). *Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/8190>
- Cedeño, E., Viteri, K. y Costa, A.** (2010). *Estudio del comportamiento de la pulpa congelada y del aceite de semillas obtenido de dos variedades diferentes de mamey Colocarpum mammosum (mamey colorado) y Mamea americana (mamey Cartagena)* [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio institucional de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/8848>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E.,...y Vieilledent, G.** (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- DRYFLOR, Bnada-R, K., Delgado-Salinas, A., Dexter, K. G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., Pullan, M., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez, G. M., Weintritt, J., Acevedo-Rodríguez, P., Adarve, J., Álvarez, E., Aranguren, A., Arteaga, J. C., Aymard, G., Castaño, A.,...Pennington, R. T.** (2016). Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science*, 353(6306), 1383-1387. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5080>
- Faicán Ortiz, K. V. e Intriago Méndez, N. L.** (2019). *Propuesta de aprovechamiento de la semilla del Chicozapote (Manilkara zapota) en la culinaria* [Trabajo de grado, Universidad de Guayaquil]. Repositorio institucional de la Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/47007>
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations].** (2019). *Trees, forests and land use in drylands: the first global assessment – full report* (FAO Forestry Paper No.184). <http://www.fao.org/3/ca7148en/ca7148en.pdf>
- Francis, J. K. y Rodríguez, A.** (1993). *Seeds of Puerto Rican trees and shrubs: second installment* (Research Note SO-374). U.S. Department of Agriculture/ Forest Service/ Southern Forest Experiment Station. <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/1686>
- García Castillo, E. F.** (2016). *Preferencias alimenticias y dispersión de semillas por grupos silvestres del Tití Cabeciblanco (Saguinus oedipus, primates) en un bosque seco tropical* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55545>
- Gentry, A. H.** (1995). Diversity and floristic composition of neotropical dry forests. En S. H. Bullock, H. A.

- Mooney y E. Medina (Eds.), *Seasonally dry tropical forests* (1ª ed) (pp. 146-194). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511753398.007>
- Gerhardt, K.** (1993). Tree seedling development in tropical dry abandoned pasture and secondary forest in Costa Rica. *Journal of Vegetation Science*, 4(1), 95-102. <https://doi.org/10.2307/3235736>
- González-M, R., García, H., Isaacs, P., Cuadros, H., López-Camacho, R., Rodríguez, N., Pérez, K., Mijares, F., Castaño-Naranjo, A., Jurado, R., Idárraga-Piedrahíta, A., Rojas, A., Vergara, H. y Pizano, C.** (2018). Disentangling the environmental heterogeneity, floristic distinctiveness and current threats of tropical dry forests in Colombia. *Environmental Research Letters*, 13(4), 045007.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. y Ryan, P. D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis (Versión 4.0.2) [Software de computador].  
[https://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm)
- Helmus, M. R., Bland, T. J., Williams, C. K. e Ives, A. R.** (2007). Phylogenetic measures of biodiversity. *The American Naturalist*, 169(3), E68-E83.  
<https://doi.org/10.1086/511334>
- Herazo Vitola, F. Y., Mercado Gómez, J. y Mendoza Cifuentes, H.** (2017). Estructura y composición florística del bosque seco tropical en los Montes de María (Sucre - Colombia). *Ciencia en Desarrollo*, 8(1), 71-82.  
<https://doi.org/10.19053/01217488.v8.n1.2017.5912>
- Janzen, D. H.** (1988). Management of habitat fragments in a tropical dry forest: growth. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 75(1), 105-116. <https://doi.org/10.2307/2399468>
- Jost, L.** (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, 88(10), 2427-2439. <https://doi.org/10.1890/06-1736.1>
- León Barbosa, E.** (2010). Lluvia de semillas efectuada por aves y murciélagos hacia pastizales asociados a un fragmento de bosque seco tropical (Córdoba-Colombia) [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Javeriana.  
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8503/tesis461.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Londoño-Lemos, V., Escobar-Hadechini, O., Tapasco-García, J. y Madriñán, S.** (2020). *Composición florística y estructura vegetal de una parcela permanente en un relicto de bosque seco tropical en el Caribe colombiano* (Versión 1.1.) [Conjunto de datos]. SiB Colombia.  
<https://doi.org/10.15472/kxbwev>
- Maia, V. A., de Souza, C. R., de Aguiar-Campos, N., Fagundes, N. C. A., Santos, A. B. M., de Paula, G. G. P., Santos, P. F., Silva, W. B., Menino, G. C. O. y dos Santos, R. M.** (2020). Interactions between climate and soil shape tree community assembly and above-ground woody biomass of tropical dry forests. *Forest Ecology and Management*, 474, 118348.  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118348>
- Marulanda, L. O., Uribe, A., Velásquez, P., Montoya, M. Á., Idárraga, Á., López, M. C. y López, J. M.** (2003). Estructura y composición de la vegetación de un fragmento de bosque seco en San Sebastián, Magdalena (Colombia). I. Composición de plantas vasculares. *Actualidades Biológicas*, 25(78), 17-30.
- Mendoza-C., H.** (1999). Estructura y riqueza florística del bosque seco tropical en la región Caribe y el Valle del río Magdalena, Colombia. *Caldasia*, 21(1), 70-94.
- Miles, L., Newton, A. C., DeFries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos V. y Gordon, J. E.** (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33(3), 491-505.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x>
- Murphy, P. G. y Lugo, A. E.** (1986). Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1), 67-88.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.000435>
- Pennington, R. T., Lavin, M. y Oliveira-Filho, A.** (2009). Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: perspectives from seasonally dry



- tropical forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 437-457.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120327>
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urceley, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., de Vos, A. C.,... y Cornelissen, J. H. C.** (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61(3), 167-234.  
[https://doi.org/10.1071/BT12225\\_CO](https://doi.org/10.1071/BT12225_CO)
- Pizano, C., Cabrera, M. y García, H.** (2014). Bosque seco tropical en Colombia; generalidades y contexto. En C. Pizano y H. García (Eds.), *El bosque seco tropical en Colombia* (1ª ed.) (pp. 37-47). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).  
<http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9333>
- Pizano, C., González-M., R., López, R., Jurado, R. D., Cuadros, H., Castaño-Naranjo, A., Rojas, A., Pérez, K., Vergara-Varela, H., Idárraga, Á., Isaacs, P. y García, H.** (2016). El bosque seco tropical en Colombia. En M. F. Gómez, L. A. Moreno, G. I. Andrade y C. Rueda (Eds.), *Biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia* (1ª ed) (pp. 22). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).  
<http://www.humboldt.org.co/es/estado-de-los-recursos-naturales/item/898-bio2015>
- Polanía Cleves, K. A.** (2019). *Biomasa aérea en estados sucesionales del bosque seco tropical en el norte del Tolima, Colombia* [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/15488>
- Putz, F. E.** (1990). Liana stem diameter growth and mortality rates on Barro Colorado Island, Panama. *Biotropica*, 22(1), 103-105.  
<https://doi.org/10.2307/2388725>
- Resolución 000571 de 2015 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]**. Por la cual se otorga una Licencia Ambiental y se dictan otras disposiciones. 09 de febrero de 2015.
- Royal Botanic Gardens Kew.** (2021). *Seed Information Database (SID)* (Versión 7.1.) [Conjunto de datos].  
<http://data.kew.org/sid/>
- Ruiz Linares, J. y Fandiño Orozco, M. C.** (2009). Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, Islas de la Vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe suroccidental. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 33(126), 5-15.
- Sánchez-Azofeifa, A., Kalacska, M. E., Quesada, M., Stoner, K. E., Lobo, J. A. y Arroyo-Mora, P.** (2003). Tropical Dry Climates. En M. Schwartz (Ed.), *Phenology: an integrative environmental science* (1ª ed) (pp. 121-137).  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-0632-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0632-3_9)
- Schnitzer, S. A., DeWalt, S. J. y Chave, J.** (2006). Censusing and measuring lianas: a quantitative comparison of the common methods. *Biotropica*, 38(5), 581-591.  
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00187.x>
- Torres, A. M., Adarve, J. B., Cárdenas, M., Vargas, J. A., Londoño, V., Rivera, K., Home, J., Duque, O. L. y González, Á. M.** (2012). Dinámica sucesional de un fragmento de bosque seco tropical del Valle del Cauca, Colombia. *Biota Colombiana*, 13(2), 66-85.
- Vallejo-Joyas, M. I., Londoño-Vega, A. C., López-Camacho, R., Galeano, G., Álvarez-Dávila, E. y Devia-Álvarez, W.** (2005). *Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia. Volumen I*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.  
<http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/34195>
- Vargas, G., Werden, L. K. y Powers, J. S.** (2015). Explaining legume success in tropical dry forest based on seed germination niches: a new hypothesis. *Biotropica*, 47(3), 277-280.  
<https://doi.org/10.1111/btp.12210>
- Villéger, S., Ramos Miranda, J., Flores Hernández, D. y Mouillot, D.** (2010). Contrasting changes in taxonomic vs. functional diversity of tropical fish

communities after habitat degradation. *Ecological applications*, 20(6), 1512-1522.

<https://doi.org/10.1890/09-1310.1>

**Webb, C. O. y Donoghue, M. J.** (2005). Phylomatic: tree assembly for applied phylogenetics. *Molecular Ecology Notes*, 5(1), 181-183.

<https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2004.00829.x>

**Zanne, A. E., Lopez-Gonzalez, G., Coomes, D. A., Ilic, J., Jansen, S., Lewis, S. L., Miller, R. B., Swenson, N. G., Wiemann, M. C., y Chave, J.** (2009). *Global Wood Density Database* [Conjunto de datos]. DRYAD.

<https://doi.org/10.5061/dryad.234>

**ANEXOS**

**Anexo 1.** Especies registradas en la parcela de 1 ha perteneciente al JBG. Se presentan los datos de la sumatoria total de área basal (m<sup>2</sup>), biomasa

(t.ha<sup>-1</sup>), número de tallos por especie e índice de valor de importancia (IVI) porcentual (el valor de IVI % corresponde a la sumatoria de tres porcentajes, por lo que su máximo valor es 300)

Familia	Especie	Área basal (m <sup>2</sup> )	Biomasa (t.ha <sup>-1</sup> )	Tallos	IVI (%)
Achatocarpaceae	<i>Achatocarpus nigricans</i>	0.610	1.258	69	23
Anacardiaceae	<i>Anacardium excelsum</i>	0.008	0.007	4	4
	<i>Spondias radlkoferi</i>	0.126	0.339	1	2
	<i>Rauvolfia viridis</i>	0.084	0.198	6	3
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana amygdalifolia</i>	0.083	0.095	66	29
	<i>Tabernaemontana cymosa</i>	0.143	0.264	5	3
	<i>Adonidia merrillii</i>	0.002	0.001	1	1
Arecaceae	<i>Roystonea regia</i>	0.192	0.351	3	3
	<i>Sabal mauritiiformis</i>	2.003	4.780	52	42
Asteraceae	<i>Mikania globifera</i>	0.001	0.014	2	1
Bignoniaceae	<i>Martinella obovata</i>	0.179	2.515	117	42
	<i>Cordia</i>	0.002	0.001	1	1
Boraginaceae	<i>Tournefortia angustiflora</i>	0.020	0.575	2	2
	<i>Mammea americana</i>	0.971	3.240	133	52
Capparaceae	<i>Capparidastrium frondosum</i>	0.186	0.341	175	70
	<i>Quadrella indica</i>	0.020	0.039	7	4
Caricaceae	<i>Carica papaya</i>	0.012	0.005	6	4
Combretaceae	<i>Combretum decandrum</i>	0.012	0.162	8	5
	<i>Acalypha macrostachya</i>	0.008	0.010	7	1
	<i>Hura crepitans</i>	0.003	0.001	2	2
Euphorbiaceae	<i>Gliricidia sepium</i>	0.083	0.267	1	2
	<i>Pithecellobium roseum</i>	0.005	0.061	3	1
	<i>Senegalia tenuifolia</i>	0.013	0.165	12	3
Fabaceae	<i>Aegiphila laeta</i>	0.037	0.724	9	5
	<i>Vitex</i>	0.009	0.021	1	1
	<i>Lamiaceae</i>	0.012	0.032	10	2
Lauraceae	<i>Nectandra turbacensis</i>	0.702	2.198	22	10
Lecythidaceae	<i>Gustavia superba</i>	0.002	0.003	1	1
Malpighiaceae	<i>Malpighia emarginata</i>	0.020	0.033	12	6
	<i>Cavanillesia platanifolia</i>	0.005	0.004	3	3
Malvaceae	<i>Sterculia apetala</i>	1.344	4.022	3	10
	<i>Cedrela odorata</i>	0.986	2.634	4	9
	<i>Guarea guidonia</i>	4.362	14.111	93	60
Meliaceae	<i>Trichilia martiana</i>	0.726	2.266	31	18
	<i>Brosimum alicastrum</i>	0.766	1.861	274	94
	<i>Ficus maxima</i>	2.616	6.895	19	28
Moraceae	<i>Trophis racemosa</i>	2.486	6.464	274	109
	<i>Neea divaricata</i>	0.020	0.027	3	1
	<i>Neea virens</i>	0.003	0.007	1	2
Nyctaginaceae	<i>Pisonia aculeata</i>	0.063	1.389	13	1
	<i>Trichostigma octandrum</i>	0.037	0.608	15	4

Familia	Especie	Área basal (m <sup>2</sup> )	Biomasa (t.ha <sup>-1</sup> )	Tallos	IVI (%)
Piperaceae	<i>Piper amalago</i>	0.128	0.125	139	9
	<i>Piper reticulatum</i>	0.027	0.019	20	34
Polygonaceae	<i>Coccoloba obovata</i>	0.021	0.027	7	3
	<i>Triplaris americana</i>	0.002	0.002	1	2
Primulaceae	<i>Primulaceae</i>	0.001	0.001	1	1
Rubiaceae	<i>Pittoniotis trichantha</i>	0.250	0.759	3	3
	<i>Psychotria carthagenensis</i>	0.001	0.001	1	1
Rutaceae	<i>Amyris elemifera</i>	0.000	0.001	1	4
	<i>Zanthoxylum</i>	0.021	0.081	1	1
Salicaceae	<i>Casearia aculeata</i>	0.004	0.007	4	4
	<i>Melicoccus bijugatus</i>	0.001	0.001	1	1
Sapindaceae	<i>Melicoccus oliviformis</i>	0.007	0.024	2	2
	<i>Paullinia</i>	0.001	0.008	2	2
	<i>Sapindus saponaria</i>	0.018	0.044	1	1
Sapotaceae	<i>Manilkara chicle</i>	0.047	0.165	32	21
	<i>Manilkara zapota</i>	0.307	0.493	87	37
Simaroubaceae	<i>Simarouba amara</i>	0.051	0.067	5	4
	<i>Cecropia peltata</i>	0.468	0.925	16	13
Urticaceae	<i>Urera baccifera</i>	0.446	0.155	170	20
	<i>Urera caracasana</i>	0.078	0.043	41	5
Vitaceae	<i>Vitis tiliifolia</i>	0.022	0.291	17	8





## Regeneración de yemas adventicias en segmentos de hojas y entrenudos de *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.

### Regeneration of adventitious buds on leaf and internode segments of *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.

Evelyn Raquel Duarte<sup>1</sup>

Duarte, E. R. (2022). Regeneración de yemas adventicias en segmentos de hojas y entrenudos de *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. *Colombia Forestal*, 22(1), 67-76.

**Recepción:** 14 de marzo 2021

**Aprobación:** 11 de agosto 2021

#### Resumen

La finalidad de este estudio fue evaluar la capacidad de regeneración de yemas adventicias en explantes de segmentos de hojas y entrenudos provenientes de plantas *in vitro*. Para ello, fueron germinadas semillas de *Balfourodendron riedelianum* en condiciones *in vitro*, y luego de un mes los explantes de hojas y entrenudos fueron cultivados en un medio Murashige y Skoog suplementado con combinaciones ANA (0.01 mg.L<sup>-1</sup>), BAP (0.1 mg.L<sup>-1</sup>) y TDZ (0.1, 0.01 mg.L<sup>-1</sup>). Los mejores resultados se obtuvieron cuando los fragmentos de entrenudos fueron cultivados en 0.1 mg.L<sup>-1</sup> de BAP y 0.01 mg.L<sup>-1</sup> de TDZ, donde el 26.67±5.77 % de los explantes brindaron 12±4.36 % de yemas por explantes. Se concluyó que los explantes de segmentos de hojas y entrenudos de *B. riedelianum* son aptos para inducir yemas adventicias.

**Palabras clave:** fitohormonas, *in vitro*, organogénesis, yemas adventicias.

#### Abstract

The purpose of this study was to evaluate the regeneration capacity of adventitious buds in explants of leaf segments and internodes from *in vitro* plants. For this purpose, seeds of *Balfourodendron riedelianum* were germinated under *in vitro* conditions, and after one month, leaf and internode explants were grown on Murashige and Skoog medium supplemented with combinations of ANA (0.01 mg.L<sup>-1</sup>), BAP (0.1 mg.L<sup>-1</sup>) and TDZ (0.1, 0.01 mg.L<sup>-1</sup>). The best results were obtained when internode fragments were grown in 0.1 mg.L<sup>-1</sup> of BAP and 0.01 mg.L<sup>-1</sup> of TDZ, in which 26.67±5.77 % of explants provided 12±4.36 % of buds per explant. It was concluded that explants of leaf segments and internodes of *B. riedelianum* are suitable to induce adventitious buds.

**Keywords:** phytohormones, *in vitro*, organogenesis, adventitious buds.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Bertoni 124 Km 3, Eldorado, Misiones, Argentina. [evelynduarte1982@gmail.com](mailto:evelynduarte1982@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

*Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. es una especie arbórea de la familia Rutaceae que crece naturalmente en el Bosque Atlántico entre Brasil y Argentina. Es una especie de alto valor ecológico y económico por poseer una madera usada en muebles de lujo, construcciones civiles, decoraciones, artesanías y carpintería en general (Assad *et al.*, 2020; Benítez *et al.*, 2018; Lisboa *et al.*, 2016; Schneider *et al.*, 2017). Sin embargo, la sobreexplotación para la utilización de su madera y la deforestación causada por el uso de tierras destinadas a labores agrícolas generó una pérdida del recurso a tal punto que se encuentra actualmente en peligro (Aguiar *et al.*, 2020). Siendo originaria de uno de los hotspots más amenazados del mundo, esta especie y todo su hábitat podrían desaparecer si no se adoptan medidas inmediatas que protejan las especies de este hotspot y los remanentes de su hábitat (Aguiar *et al.*, 2020; FVSA y WWF, 2017; Lanzone *et al.*, 2018). Por esta razón, es necesario generar de manera urgente estrategias que permitan la conservación de esta especie a largo plazo. De ahí la importancia de elaborar protocolos de propagación para obtener plantas que se adapten a las condiciones de campo y admitan su supervivencia a través del tiempo (Álvarez *et al.*, 2011). En este sentido, una herramienta biotecnológica útil y de amplio uso en los últimos años para el rescate, la conservación y la multiplicación de especies arbóreas nativas es el cultivo *in vitro* (Vidal Cob-Uicab *et al.*, 2011). Las técnicas de este cultivo ofrecen la ventaja que de una pequeña porción de la planta –conocido con el nombre de explante– se pueden propagar masivamente aquellos ejemplares que poseen las mejores características morfológicas y adaptativas. Además, a través del cultivo *in vitro* se pueden establecer protocolos de propagación eficientes y económicos que pueden ser utilizados con éxito en programas de reforestación (Álvarez *et al.*, 2011).

Entre las técnicas del cultivo *in vitro* se encuentra la regeneración vía organogénesis, que es la

producción de vástagos unipolares con la capacidad de enraizar espontáneamente o con reguladores de crecimiento. Ocurre por estimulación de las yemas preexistentes (axilares) o a partir del tejido de *novo* (yemas adventicias). La multiplicación de yemas preformadas se da generalmente sin formación de callo y tiene la desventaja de limitar la producción de brotes, aunque puede aumentarse la tasa de multiplicación por medio de subcultivos posteriores. En el caso del desarrollo de yemas adventicias se requiere inducir formación de tejido meristemático con o sin formación de callo (organogénesis directa e indirecta), utilizando reguladores de crecimiento para estimular, en primer lugar, la diferenciación del primordio y luego el crecimiento del vástago. Así, con esta técnica se obtiene una mayor cantidad de brotes por unidad de superficie, pues no es necesario la presencia de meristemas en el tejido que se utiliza como explante (Olmos *et al.*, 2010).

Si bien la organogénesis adventicia fue obtenida exitosamente en numerosas especies leñosas como *Phellodendron amurense*, *Aegle marmelos* y *Murraya koenigii* (Khatik y Joshi, 2017; Kumari *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2011), muchas especies arbóreas pueden ser recalcitrantes, pues no es posible su regeneración *in vitro*. La utilización de explantes se limita, entonces, a embriones zigóticos o partes de plántulas, y estos, a su vez, pueden presentar dificultades –en el cultivo *in vitro*– por la lixiviación de fenoles (Bonga *et al.*, 2010; Villalobos y Thorpe, 1991).

Además de los inconvenientes que presentan algunas especies leñosas, la morfogénesis *in vitro* está altamente influenciada por factores como la variación genética, la condición fisiológica de la planta, las condiciones de cultivo (Córdova *et al.*, 2014; Domínguez-Perales *et al.*, 2016; Villanueva *et al.*, 2013) y el tipo de explante, hormona y dosis utilizada (Rodríguez-Beraud *et al.*, 2014). Por lo tanto, es de vital importancia realizar estudios para identificar los factores que influyen en el cultivo *in vitro* de cada especie, a fin de generar protocolos confiables y reproducibles. Con esta iniciativa en

mente, el primer y único estudio publicado con la intención de realizar protocolos *in vitro* de la especie fue el de Niella *et al.* (1996), pero sin resultados positivos en la organogénesis de explantes de hojas.

Por lo antes expuesto, en el presente estudio se investigó la factibilidad de inducir yemas adventicias en segmentos de hojas y entrenudos para iniciar protocolos de propagación que permitan multiplicar vegetativamente esta especie en un corto periodo de tiempo y en espacios reducidos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Origen de las semillas

Los frutos de los cuales se extrajeron las semillas para el experimento fueron cosechados en la Reserva de Uso Múltiple (26°54'59" latitud sur - 54°12'18" longitud oeste) de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM), localizada en el Departamento de Guaraní (Argentina), y luego almacenadas en bolsas de polietileno dentro de refrigeradores a 4°C hasta realizar el ensayo, que se llevó a cabo en el Laboratorio de Propagación Vegetativa de la Facultad de Ciencias Forestales de la UNaM.

### Desinfección y germinación de semillas

En primer lugar, se procedió a quitar las semillas de los frutos con un bisturí; luego, en condiciones de asepsia y en cámara de flujo laminar, las semillas fueron sometidas a una desinfección superficial, que consistió en sumergirlas inicialmente en una solución de peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) de 30 volúmenes durante 16 horas, después en una solución de alcohol del 70 % por un minuto y, para terminar, en una solución NaClO al 1.5 % con 3 gotas de detergente neutro por 20 minutos; para finalizar, la desinfección se realizó con tres enjuagues de agua destilada estéril.

El medio utilizado para la germinación consistió en el uso de sales básicas del medio MS en su concentración original (Murashige y Skoog, 1962), adicionado con 30 g.L<sup>-1</sup> de sacarosa, 6 g.L<sup>-1</sup> de agar-agar, libre de reguladores del crecimiento y ajustado a un pH de 5.8 con KOH o HCl previo adición del agente gelificante; posteriormente, fue esterilizado en una autoclave por calor húmedo a una presión de 1.46 k.cm<sup>-2</sup> durante 20 minutos. Las semillas fueron cultivadas individualmente en condiciones de asepsia en tubos de 15 mL de capacidad que contenían 4 mL de medio cultivo y, a continuación, incubados por un periodo de 30 días en condiciones ambientales de luz (116 μmol.m<sup>-2</sup>. s<sup>-1</sup>, PAR, fotoperíodo de 16 horas), a temperatura controlada (27±2 °C).

### Inducción de yemas adventicias en medio semisólido

Para la inducción de la organogénesis se utilizaron como explante segmentos de entrenudos (5 mm) y hojas (5 x 5 mm) obtenidos de plantas germinadas *in vitro* de 1 mes de edad. Estos segmentos fueron cultivados individualmente en condiciones de asepsia en tubos de 10 mL de volumen, a los cuales se les dispensó 4 mL de medio por tubo, con las sales básicas del medio MS en su concentración original, adicionado con 30 gr.L<sup>-1</sup> de sacarosa, phytigel 3.5 gr.L<sup>-1</sup>, Ácido Naftalenacético (ANA) (0.01 mg.L<sup>-1</sup>), Bencil-aminopurina (BAP) (0.1 mg.L<sup>-1</sup>) y Thidiazuron (TDZ) (0.01, 0.1 mg.L<sup>-1</sup>), y ajustado a 5.8 de pH con KOH o HCl antes de agregar el agente gelificante; luego se realizó la esterilización por calor húmedo en una autoclave a una presión de 1.46 k.cm<sup>-2</sup> durante 20 minutos. Es preciso señalar que los cultivos fueron incubados bajo las mismas condiciones antes mencionadas. Por último, para cuantificar el proceso morfogénico al cabo de 60 días se evaluó el porcentaje de explante con yemas y el número de yemas por explante.

## Diseño experimental y análisis estadístico

Las variables fueron evaluadas con arreglo factorial en un diseño completamente aleatorizado de 8 tratamientos, con tres repeticiones de 10 unidades experimentales compuestas por un explante (Tabla 1). Los datos fueron sometidos a un análisis de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk modificado y de homocedasticidad mediante la prueba de Levene; posteriormente, se realizó un análisis de variancia sobre los datos de las variables y las medias fueron comparadas entre sí por la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, con un nivel de confianza de 0.05, para determinar el grado de significancia entre los distintos tratamientos por medio del software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2016).

## RESULTADOS

La desinfección realizada en este estudio permitió conseguir un cultivo libre de contaminación visible en un 97.73 % y una germinación del 86.36 %, con lo cual se obtuvieron plántulas asepticas, vigorosas y con radícula y vástago de normal desarrollo.

Por otro lado, la utilización del medio MS suplementado con BAP, ANA y TDZ favoreció la

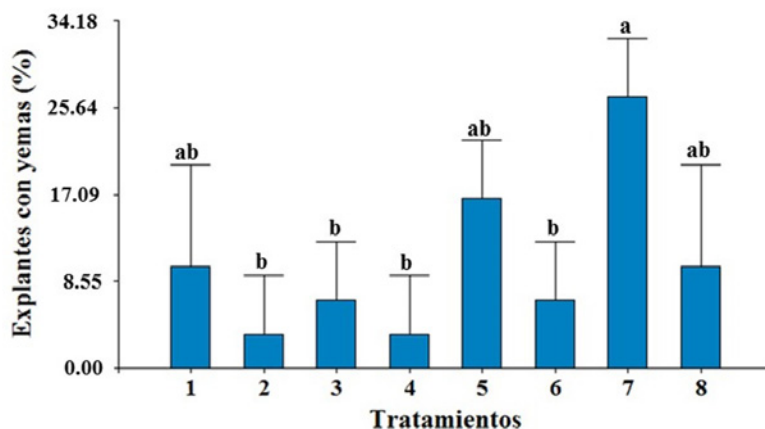
inducción de organogénesis en segmentos de hojas y entrenudos. De los explantes utilizados el que tuvo mayor capacidad morfogénica fue el segmento de entrenudos, manifestando diferencias significativas ( $F = 3.70$ ,  $p\text{-valor} = 0.014$ ) en la variable porcentaje de explantes con yemas (Figura 1). El mejor tratamiento para la inducción de yemas adventicias fue la combinación  $0.1 \text{ mg.L}^{-1}$  BAP con  $0.01 \text{ mg.L}^{-1}$  TDZ, donde se logró un porcentaje de regeneración del  $26.67 \pm 5.77 \%$  para los segmentos de entrenudos. En cuanto a los segmentos de hojas la respuesta morfogénica fue inferior, sin embargo, el tratamiento que manifestó mayor porcentaje de explantes con yemas ocurrió al adicionar al medio  $0.01 \text{ mg.L}^{-1}$  de ANA y TDZ en sus dos concentraciones ( $0.01 - 0.1 \text{ mg.L}^{-1}$ ), aunque sin diferencias significativas con los demás tratamientos (Figura 1).

Transcurridos 60 días del cultivo, en los explantes de hojas solo se observaron yemas, en tanto que en los entrenudos se observaron yemas y brotes de hasta 13 mm de longitud. El número promedio de yemas por explante fue de  $3.33 \pm 0.58$  a  $12.00 \pm 4.36$  en los distintos tratamientos, observándose la mayor cantidad de yemas adventicias –para ambos explantes– en aquellos tratamientos en los que se adicionó  $0.01 \text{ mg.L}^{-1}$  de TDZ y  $0.1 \text{ mg.L}^{-1}$  de BAP al medio basal, si bien no se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos (Figura 2).

**Tabla 1.** Tratamientos según las dosis de Ácido Naftalenacético (ANA), Bencil-aminopurina (BAP) y Thidiazuron (TDZ), y el tipo de explante

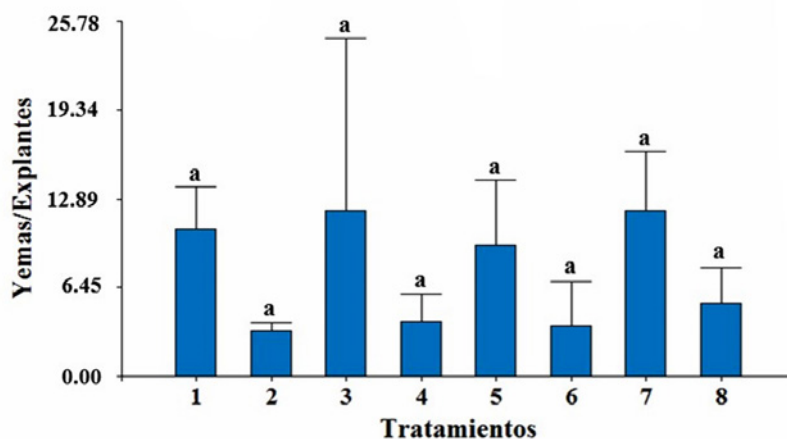
Tratamientos	Repetición 3.(n)	ANA $\text{mg.L}^{-1}$	BAP $\text{mg.L}^{-1}$	TDZ $\text{mg.L}^{-1}$	Explante
1	10	0.01	---	0.01	Hoja
2	10	0.01	---	0.1	Hoja
3	10	---	0.1	0.01	Hoja
4	10	---	0.1	0.1	Hoja
5	10	0.01	---	0.01	Entrenudo
6	10	0.01	---	0.1	Entrenudo
7	10	---	0.1	0.01	Entrenudo
8	10	---	0.1	0.1	Entrenudo





**Figura 1.** Efecto de las dosis y la combinación de fitohormonas sobre el porcentaje de explante con yemas en los segmentos de hojas y entrenudos.

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos a un nivel de confianza de 0.05, según el test de comparaciones múltiples de Tukey.



**Figura 2.** Efecto de los tratamientos sobre el número promedio de yemas por explantes en los segmentos de hojas y entrenudos sin diferencias significativas entre tratamientos, a un nivel de confianza de 0.05.

## DISCUSIÓN

La obtención de plantas de *B. riedelianum* vía mecanismos convencionales por semillas tiene una eficiencia del 11 % al 83 % y se requieren tratamientos pregerminativos apropiados para obtener altos valores de germinación, aunque siempre se

obtiene una única planta por semilla (Guollo *et al.*, 2016; Rodrigues-Gomes *et al.*, 2016). En cambio, en el cultivo *in vitro*, a través de la organogénesis adventicia, se pueden obtener una gran cantidad de plantas a partir de una pequeña porción de vegetal (García-Campusano *et al.*, 2019). Aun así, para obtener organogénesis es necesario que

ocurran cambios en la fisiología celular y en los mecanismos de transcripción, y también deben estar presentes fitohormonas específicas y células meristemáticas. En este sentido es que las auxinas y citoquininas desempeñan un rol importante en la formación de órganos (Sluis y Hake, 2015).

Para el caso de este estudio, se demostró que la utilización del TDZ combinado con ANA o BAP en el medio de cultivo promovieron el desarrollo de yemas en explantes de hojas y entrenudos de *B. riedelianum*. En efecto, el tratamiento en que se adicionó BAP 0.1 mg.L<sup>-1</sup> con TDZ 0.01 mg.L<sup>-1</sup> evidenció la mayor proporción de explantes inducidos en los segmentos de entrenudos. En consecuencia, el TDZ combinado con el BAP fue más efectivo en la inducción de brotes que la combinación TDZ-ANA, debido a que manifestaron una mayor inducción de yemas adventicias en los explantes de segmentos de entrenudos. Esta combinación BAP-TDZ también ha sido altamente efectiva en la inducción de segmentos de hipocótilo de *Murraya koenigii*, pero enfocada en el desarrollo de embriones somáticos (Khatik y Joshi, 2015). Por su parte, Al-Ajlouni et al. (2015) concluyeron que el agregado de TDZ al medio de cultivo favoreció significativamente la proliferación de brotes en explantes de *Ruta graveolens*. Así mismo, Xi et al. (2020) determinaron que la baja concentración de TDZ es favorable en la proliferación de callos y la diferenciación de brotes adventicios.

En cuanto a los explantes de hojas cultivados en un medio con TDZ-ANA, con una dosis de 0.01 mg.L<sup>-1</sup>, se presentó la mayor cantidad de explantes inducidos pese a que no se manifestaron diferencias significativas con los demás tratamientos. Así pues, Azad et al. (2005) informaron que la combinación TDZ-ANA, adicionado al medio de cultivo de explantes de hojas, ha generado una mayor proliferación de callos organogénicos que la combinación BAP-ANA. Por el contrario, Ahmad et al. (2010) demostraron que la mayor cantidad de explantes de hoja de *Ruta graveolens* fueron inducidos cuando se utilizó BAP-ANA.

Si bien las aplicaciones exógenas de citoquininas provocan cambios en los niveles de citoquininas naturales (Hare y van Staden, 1994) que estimulan la producción de brotes (Glocke et al., 2006), el TDZ es un compuesto sintético que se emplea como hormona y es considerado más efectivo que las citoquininas en la inducción y diferenciación de yemas adventicias en especies leñosas y recalcitrantes. Pese a esto, se aconseja utilizarlo en bajas concentraciones, dado que puede inhibir el crecimiento de los brotes (Huetteman y Preece, 1993; Parismoreno et al., 2016). Ahora bien, el uso individual del BAP puede inducir la proliferación de callo y desarrollo de meristemo y brotes, pero es necesario tener en cuenta que la acción de esta hormona es beneficiada a través de subcultivos con dosis mayores o combinándola con otros reguladores de crecimiento tales como el TDZ (Glocke et al., 2006) de la manera en que se realizó en este estudio.

Cabe señalar que el tipo de explante usado en la regeneración *in vitro* de *B. riedelianum* afecta la eficiencia de regeneración indirecta, siendo –en este caso– los explantes con mayor frecuencia de inducción de yemas adventicias los del segmento de entrenudos, tal como lo observaron Khatik y Joshi (2017), quienes utilizando de manera combinada dos citoquininas (BAP-Kinetina) obtuvieron yemas adventicias en un 82 % de los entrenudos y 72.80 % en hojas de *Murraya koenigii*. También los segmentos de hojas de este estudio presentaron la menor proporción de explantes con yemas (Figura 1), pero similar número de yemas por explante que los segmentos de entrenudos (Figura 2). Así mismo, en los explantes de hojas las yemas no elongaron en los distintos tratamientos, lo cual pudo deberse a la ontogenia del material o a la dosis de TDZ utilizada (De Melo-Ferreira et al., 2006; Monteuuis, 2004).

Por consiguiente, los resultados de este estudio han demostrado que la regeneración *in vitro* de yemas adventicias en segmentos de hojas y entrenudos de plántulas de un mes de edad de *B.*

*riedelianum* es factible. No obstante, se requieren mayores estudios para mejorar, por un lado, la eficiencia en cuanto a la multiplicación de yemas en los explantes, y, por el otro, las siguientes fases del protocolo *in vitro* hasta obtener plantas completas, ya que la supervivencia en campo de un vegetal depende de la calidad de la planta y esta, a su vez, tiene estrecha relación con los aspectos morfológicos y ecológicos que adquieren las plantas durante el proceso de propagación (Chávez y de Fera, 2012; Rueda-Sánchez *et al.*, 2014). En este sentido, la biotecnología puede contribuir a desarrollar protocolos de propagación o de mejoramiento genético, para lo cual es necesario contar con sistemas de regeneración de plantas que empleen las técnicas de organogénesis y embriogénesis (Gálvez-Tuesta y Chico-Ruíz, 2016). Por lo que los resultados de este estudio serían de utilidad para contribuir a la conservación de esta especie, al proponer protocolos de dispersión –sobre la base de segmentos de hojas y entrenudos– que permitan masificar su propagación a partir de unas pocas semillas.

## CONCLUSIONES

En *B. riedelianum* la proporción de explantes con organogénesis adventicia es influenciada por el tipo de explante, hormonas y dosis utilizadas, siendo más efectivo el segmento de entrenudos y la combinación de BAP-TDZ a baja concentración. En cambio, la cantidad de yemas obtenidas por explantes no es afectada por los factores estudiados aquí.

Estos resultados aportan información relevante que puede contribuir a generar protocolos de propagación para programas de conservación, enriquecimiento o reforestación con *B. riedelianum* en la región del Bosque Atlántico, entre Brasil y Argentina. Además, pueden ser utilizados como base para crear bancos de germoplasmas *in vitro* que también aporten para conservar la especie a largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM) por el apoyo, los insumos y los equipamientos necesarios para la realización de este trabajo.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

La autora es la única responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

## CONFLICTO DE INTERESES

La autora declara que no existen conflictos de intereses.

## REFERENCIAS

- Aguiar, B. I., Freitas, M. L. M., Zannato, A. S., Tamburussi, E. V., Moraes, M. L. T., Ambrosano, M. N., Pereira L. C. S. M., Gandara F. B., Kageyama P. Y. y Sebbenn, A. M. (2020). The effects of pollen dispersal and mating pattern on inbreeding depression and hybrid vigor in *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. (Rutaceae). *Conservation Genetics*, 21(2), 305-317.  
<https://doi.org/10.1007/s10592-020-01250-0>
- Ahmad, N., Faisal, M., Anis, M. y Aref, I. M. (2010). In vitro callus induction and plant regeneration from leaf explants of *Ruta graveolens* L. *South African Journal of Botany*, 76(3), 597-600.  
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.03.008>
- Al-Ajlouni, Z. I., Abbas, S., Shatnawi, M. y Al-Makhadmeh, I. (2015). In vitro propagation, callus induction, and evaluation of active compounds on *Ruta graveolens*. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 13(2), 101-106.  
<https://doi.org/10.1234/4.2015.3943>

- Álvarez, J. C., Beltrán, P., Diana, M. y Neftali, M. L. (2011). Evaluación de reguladores de crecimiento vegetal en la organogénesis de *Gmelina arborea* roxb. *Revista Tumbaga*, 6, 107-124.
- Assad, A. A. V., Ballarin, A. W., Freitas, M. L. M. y Longui, E. L. (2020). Effect of provenances on wood properties of *Balfourodendron riedelianum*. *Madera y bosques*, 26(1), 1-11.  
<https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611905>
- Azad, M. A. K., Yokota, S., Ohkubo, T., Andoh, Y., Yahara, S. y Yoshizawa, N. (2005). *In vitro* regeneration of the medicinal woody plant *Phellodendron amurense* Rupr. through excised leaves. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 80(1), 43-50.  
<https://doi.org/10.1007/s11240-004-8809-5>
- Benítez, B., González, F., Pérez, S. y Bertoni, S. (2018). Elaboración de artesanía popular en madera en comunidades urbanas de Asunción, Areguá y Tobatí (Paraguay). *Botanica complutensis*, 42, 149-160.  
<https://doi.org/10.5209/BOCM.61374>
- Bonga, J. M., Klimaszevska, K. K. y von Aderkas, P. (2010). Recalcitrance in clonal propagation, in particular of conifers. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 100(3), 241-254.  
<https://doi.org/10.1007/s11240-009-9647-2>
- Chávez, M. y de Feria, M. (2012). Aspectos básicos de la propagación *in vitro* del género *Pinus* por organogénesis. *Bioteología Vegetal*, 12(3), 131-142.
- Córdova, A. M., Cobos, M., Imán, S. A. y Castro, J. C. (2014). Un método eficiente para la inducción de callos *in vitro* en *Myrciaria dubia* (Kunth) Mc Vaugh "Camu Camu". *Scientia Agropecuaria*, 5(1), 25-34.  
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.01.03>
- De Melo Ferreira, W., Kerbauy, G. B., Kraus, J. E., Pescador, R. y Suzuki, R. M. (2006). Thidiazuron influences the endogenous levels of cytokinins and IAA during the flowering of isolated shoots of *Dendrobium*. *Journal of Plant Physiology*, 163(11), 1126-1134.  
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.07.012>
- Di Rienzo, J., Balzarini, M., González, L., Casanoves, F., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2016). *InfoStat* (Versión 2017) [Software de computador]. Universidad Nacional de Córdoba (UNC). <https://www.infostat.com.ar/>
- Domínguez-Perales, L. A., Domínguez-Álvarez, J. L., Cruz-Izquierdo, S., Santacruz-Varela, A., Barrientos-Priego, A., Padilla-Ramírez, J. S. y Gutiérrez-Espinosa, M. A. (2016). Propagación *in vitro* de selecciones de guayabo (*Psidium guajava* L.). *Revista fitotecnia mexicana*, 39(3), 285-295.
- FVSA [Fundación Vida Silvestre Argentina] y WWF [World Wildlife Fund]. (2017). *El estado del Bosque Atlántico: tres países, 148 millones de personas, uno de los bosques más ricos del Planeta*.  
<https://www.vidasilvestre.org.ar/?18821/Nueva-publicacin-El-Estado-del-Bosque-Atlntico>
- Gálvez-Tuesta, O. y Chico-Ruiz, J. (2016). Callos embriogénicos inducidos en tallos de *Persea americana* Mill. "palto" con diferentes combinaciones de reguladores del crecimiento. *Sagasteguiana*, 4(1), 39-50.  
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/REVSAGAS/article/view/2510>
- García-Campusano, F. T. A., Mojarás-González, G., Galindo-Flores, G., Ponce-Mendoza, A., Chávez-Ávila, V. M. y Márquez-Guzmán, J. (2019). Morfogénesis *in vitro* de brotes adventicios del pinabete mexicano *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(56), 113-135.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.545>
- Glocke, P., Collins, G. y Sedgley, M. (2006). 6-Benzylamino purine stimulates *in vitro* shoot organogenesis in *Eucalyptus erythronema*, *E. stricklandii* and their interspecific hybrids. *Scientia Horticulturae*, 109(4), 339-344.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.05.010>
- Guollo, K., Felippi, M., Possenti, J. C., Debastiani, A. B., Otalakoski, J. y Corrêa, B. J. S. (2016). Avaliação do potencial germinativo de sementes de *Balfourodendron riedelianum*. *Nucleus*, 13(2), 153-157.  
<https://doi.org/10.3738/1982.2278.1669>
- Hare, P. D. y van Staden, J. (1994). Cytokinin oxidase: biochemical features and physiological significance. *Physiologia Plantarum*, 91(1), 128-136.  
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb00668.x>

- Huetteman, C. A. y Preece, J. E. (1993).** Thidiazuron: a potent cytokinin for woody plant tissue culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 33(2), 105-119.  
<https://doi.org/10.1007/BF01983223>
- Khatik, N. y Joshi, R. (2015).** Protocol for regeneration of plantlets through somatic embryogenesis from hypocotyl of curry leaf plant (*Murraya koenigii* L. Spreng). *Journal of Phytological Research*, 28(1-2), 25-32.
- Khatik, N. y Joshi, R. (2017).** An efficient protocol for *in vitro* shoot regeneration from different explants of *Murraya koenigii* (L.) Spreng. *Journal of Phytological Research*, 30(1), 59-67.
- Kumari, R. U., Lakshmi, S. M. y Thamodharan, G. (2015).** Effect of growth hormones for direct organogenesis in Bael (*Aegle marmelos* (L.) corr). *Journal of Applied and Natural Science*, 7(1), 98-101.  
<https://doi.org/10.31018/jans.v7i1.570>
- Lanzone, C., Labaroni, C. A., Formoso, A., Buschiazio, L. M., da Rosa, F. y Teta, P. (2018).** Diversidad, sistemática y conservación de roedores en el extremo sudoccidental del Bosque Atlántico Interior. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 20(1), 151-164.
- Lisboa, T. de F. B., Cielo-Filho, R., Câmara, C. D. y da Silva, W. B. (2016).** Aspectos botânicos e ecossistêmicos como subsídio à interpretação ambiental na trilha do Parque Municipal Farroupilha, Oeste do Paraná. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 11(2), 74-90.  
<https://doi.org/10.34024/revbea.2016.v11.2223>
- Monteuuis, O. (2004).** *In vitro* micropropagation and rooting of *Acacia mangium* microshoots from juvenile and mature origins. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 40(1), 102-107.  
<https://doi.org/10.1079/IVP2003493>
- Murashige, T. y Skoog, F. (1962).** A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15, 473-497.  
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- Niella, S. P., Noguera, A. M., Vera, J. L. y Niella, F. O. (1996).** Cultivo *in vitro* de guatambú blanco (*Balfourodendron riedelianum*) y cedro misionero (*Cedrela fissilis*). *Revista Forestal Yvyretá*, 7(6), 43-46.
- Olmos, S., Luciani, G. y Galdeano, E. (2010).** Micropropagación. En G. Levitus, V. Echenique, C. Rubinstein, E. Hopp y L. Mroginski (Eds.), *Biotecnología y mejoramiento vegetal II* (pp. 354-362). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.  
<https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/BiotecnologiayMejoramientovegetalII.pdf>
- Parismoreno, L., Gordillo, F. y Santos, E. (2016).** Determinación de tiazuron (tdz) para la fase de multiplicación *in vitro* de caimito (*Chrysophyllum cainito* L.). *Yachana Revista Científica*, 5(2), 25-31.
- Rodríguez-Beraud, M. M., Latsague-Vidal, M. I., Chacón-Fuentes, M. A. y Astorga-Brevis, P. K. (2014).** Inducción *in vitro* de callogénesis y organogénesis indirecta a partir de explantes de cotiledón, hipocótilo y hoja en *Ugni molinae*. *Bosque (Valdivia)*, 35(1), 111-118.  
<https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100011>
- Rodrigues-Gomes, D., Machado-Araujo, M., Rossi-Nunes, U. y Carpenedo-Aimi, S. (2016).** Biometry and germination of *Balfourodendron riedelianum* Eng. *Journal of Seed Science*, 38(3), 187-194.  
<http://dx.doi.org/10.1590/2317-1545v38n3159311>
- Rueda-Sánchez, A., Benavides-Solorio, J. de D., Saenz-Reyez, J., Muñoz Flores, H. J., Prieto-Ruiz, J. Á. y Orozco-Gutiérrez, G. (2014).** Calidad de planta producida en los viveros forestales de Nayarit. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(22), 58-73.
- Schneider, C. F., Dranski, J. A. L., Gusatto, F. C., de Matos Malavasi, M. y Malavasi, U. C. (2017).** Equações de longevidade para sementes de pau-marfim. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 60(1), 53-59.  
<http://dx.doi.org/10.4322/rca.2259>
- Sluis, A. y Hake, S. (2015).** Organogenesis in plants: initiation and elaboration of leaves. *Trends in Genetics*, 31(6), 300-306.  
<https://doi.org/10.1016/j.tig.2015.04.004>

- Vidal Cob-Uicab, J., Sabja, A. M., Ríos-Leal, D., Lara-Aguilar, A., Donoso, P. J., González, M. E. y Escobar, B. (2011).** Potencial de la organogénesis como estrategia para la masificación *in vitro* de *Fitzroya cupressoides* en Sudamérica Austral. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(3), 423-433.  
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.118>
- Villalobos, V. M. y Thorpe, T. A. (1991).** Micropropagación: conceptos, metodología y resultados. En W. M. Roca y L. A. Mroginski (Eds.), *Cultivo de tejidos en la agricultura: fundamentos y aplicaciones* (pp. 127-141). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos\\_Ciat/biblioteca/Cultivo\\_de\\_tejidos\\_en\\_la\\_agricultura.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/Cultivo_de_tejidos_en_la_agricultura.pdf)
- Villanueva, F., Ávila, M., Mansilla, A., Abades, S. y Cáceres, J. (2013).** Efecto de auxinas y citoquininas en el cultivo de tejido de *Ahnfeltia plicata* (Hudson) Fries, 1836 (Ahnfeltiales, Rhodophyta) de la región de Magallanes. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 41(1), 99-111. Universidad de Magallanes.  
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2013000100009>
- Wang, H. M., Chen, Y. J., Yu, H. D. y Zu, Y. G. (2011).** Adventitious shoot regeneration from *in vitro* stem explants of *Phellodendron amurense*. *African Journal of Biotechnology*, 10(64), 14024-14028.  
<https://doi.org/10.5897/AJB11.1569>
- Xi, Y. K., Wang, Y., Zeng, B., Huang, H. Y. y Yang, W. D. (2020).** Callus induction and adventitious bud differentiation of *Cyclocodon lancifolius* (Roxb.) Kurz. *Botanical Sciences*, 98(4), 534-544.  
<https://doi.org/10.17129/botsci.2609>





## Función ahusamiento-volumen comercial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. & Cham. en varias regiones de México

### Commercial taper-volume function of *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. & Cham. in several regions of Mexico

Juan Carlos Guzmán-Santiago<sup>1\*</sup>, Benedicto Vargas-Larreta<sup>2</sup>,  
Martín Gómez-Cárdenas<sup>3</sup> y Gerónimo Quiñonez-Barraza<sup>4</sup>

Guzmán-Santiago, J. C., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M. y Quiñonez-Barraza, G. (2022). Función ahusamiento-volumen comercial de *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. & Cham. en varias regiones de México. *Colombia Forestal*, 25(1), 77-94.

**Recepción:** 27 de marzo 2021

**Aprobación:** 11 de agosto 2021

#### Resumen

La relación ahusamiento-volumen es indispensable para la planeación del manejo silvícola en los bosques con la finalidad de favorecer la distribución de los productos. Por esta razón, el objetivo del presente estudio fue generar un modelo compatible que permitiera estimar de forma precisa el volumen-ahusamiento de *Abies religiosa* en varias regiones de México. Se utilizaron 2608 datos en el análisis de la información y el modelo se ajustó simultáneamente mediante la regresión aparentemente no relacionada (RAN) para la estimación de los parámetros compatibles. El modelo generó coeficientes de determinación ajustados superiores al 97 %, raíces del medio cuadrático menores al 0.40, sesgos menores a 0.11, con certeza para modelar cada región forestal; datos que fueron complementados con sus respectivos criterios de información Akaike (AIC). En la mayoría de los casos el factor de forma de la especie fue de neiloide a paraboloid, información que será de utilidad para la elaboración de inventarios forestales.

**Palabras clave:** altura, bondad de ajuste, diámetro, factor de forma, regresión aparentemente no relacionada.

#### Abstract

The taper-volume relationship is an essential tool for planning silvicultural management in forests with the final aim of promoting the distribution of products. The objective of this study is the generation of a compatible model that allows an accurate estimation of the taper-volume of *Abies religiosa* in several regions of Mexico. A data set of 2608 values was considered for the analysis of the information; the model was simultaneously adjusted by seemingly unrelated regression (SUR) for the estimation of compatible parameters. The model generated coefficients of determination with fit levels higher than 97 %, roots mean square less than 0.40, biases lower than 0.11, with certainty to model each forest region, which are complemented with their respective Akaike information criteria (AIC). In most cases, the shape factor of the species went from neiloid to paraboloid. This information will be useful for timber forest inventories.

**Keywords:** height, goodness of fit, diameter, factor of shape, seemingly unrelated regression.

1 Centro de Investigación, Divulgación y Asesoría Técnica Forestal y Agropecuaria (SC). Tlaxiaco, Oaxaca, México.

2 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México.

3 Campo experimental Uruapan, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Michoacán, México.

4 Campo experimental Valle del Guadiana, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Camino Real, Durango, México.

\* Autor para correspondencia: [charly.230584@gmail.com](mailto:charly.230584@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

Las actividades silvícolas que se implementan en el bosque tienden a mejorar las condiciones, garantizando de esta manera un alto porcentaje de aprovechamiento en volumen forestal maderable (Valencia-Manzo *et al.*, 2017). Ante esto, las regresiones lineales y no lineales son herramientas que brindan información confiable sobre las variables de interés, facilitando así su análisis e interpretación (Guzmán-Santiago *et al.*, 2020a).

Este tipo de sistemas realizan predicciones de volumen en distintas alturas del árbol, lo que permite hacer clasificaciones de productos, y que se define como la disminución del diámetro con base al aumento de la altura del árbol (Kozak, 1988). Los tipos de modelos se clasifican en árboles individuales, segmentados y de exponente variable (Burkhardt y Tomé, 2012), y se caracterizan por ser flexibles y precisos para generar información de volumen comercial de un árbol en pie (Milena-López *et al.*, 2015).

El sistema compatible permite describir los distintos segmentos del árbol, desde un neiloide en la base a formas cilíndricas o paraboloides truncadas (en la zona de mayor aprovechamiento comercial), hasta terminar en su forma cónica o paraboloides en la punta del árbol (Tamarit-Urías *et al.*, 2014), por lo que los diferentes factores ambientales y las actividades silvícolas son claves en la forma geométrica que toma el fuste de cada especie (Uranga-Valencia *et al.*, 2015). Demaerschalk (1972) menciona que se puede tener un modelo compatible siempre que estén definidos los mismos parámetros, así como una estructura geométrica común. Además, por ser de tipo no lineal, facilitan la descripción de los datos de las especies (Urbano *et al.*, 2018).

En este sentido, el modelo de Fang *et al.* (2000) puede emplearse sin problemas en la planificación forestal, dado que incorpora de manera implícita la ecuación de volumen total de Schumacher y Hall (1933) y, a su vez, puede ser reemplazada por otra similar, según sea conveniente, lo que permite

generar una mayor ganancia en el aprovechamiento (Niño-López *et al.*, 2018). El modelo es capaz de describir el conjunto de datos del fuste y el volumen de cualquier especie sin ningún inconveniente (Özçelik y Göçeri 2015; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014), además de las especies tropicales, lo que facilita su incorporación a los sistemas biométricos (López-Martínez *et al.*, 2020).

Durante décadas, diferentes entidades federativas de México han utilizado ecuaciones no apropiadas para cada especie (Cruz-Cobos *et al.*, 2016), por lo que no existe una confianza general en las estimaciones deseadas (Azevêdo *et al.*, 2014). De ahí que varios investigadores e instituciones mostrarán interés por generar ecuaciones propias para algunas especies de tipo comercial con la finalidad de apoyar a los manejadores del bosque y, a su vez, obtener información verídica sobre los rendimientos maderables para tomar decisiones sobre su manejo (Vargas-Larreta *et al.* 2017).

En México, el género *Abies* es la segunda pínacea maderable, siendo *A. religiosa* la especie de mayor importancia económica y la más aprovechable, pues contribuye con el 2.8 % de la producción maderable anual (SEMARNAT, 2016). La superficie que ocupa dentro del territorio del país oscila entre 0.07 % y 0.16 %, y su distribución se presenta en forma de parches aislados (INEGI, 2017). Considerando lo anterior, el objetivo del presente estudio fue generar un sistema compatible que permitiera estimar de forma precisa el ahusamiento-volumen comercial, además de analizar los tipos dendrométricos de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en varias regiones de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se desarrolló en ocho entidades federativas que corresponden a 20 Unidades de Manejo Forestal (UMAFOR). Estas fueron: Guerrero (1203),



Hidalgo (1303), Jalisco (1404, 1406, 1410), Estado y Ciudad de México (1503, 1507, 1508, 1510), Michoacán (1604, 1605, 1607, 1608), Puebla (2101, 2105, 2108), Tlaxcala (2901, 2902) y Veracruz (3004, 3012) (Tabla 1).

## Tamaño de muestra

El tamaño de muestra fue constituido por 2608 árboles de análisis ahusamiento a partir de un muestreo aleatorio por cada UMAFOR en las zonas bajo aprovechamiento forestal y en áreas sin autorización. Para el primer caso se derribaron, seccionaron y midieron cada una de las trozas, mientras que en las áreas no autorizadas se tomaron datos en forma escalonada con una forcípula laser que proporcionó información confiable para hacer la medición del diámetro a distintas alturas (Diéguez-Aranda *et al.*, 2005), considerando en todo momento las diferentes categorías diamétricas. En cada sitio, el diámetro normal fue medido con cinta diamétrica y en ocasiones con forcípulas, y para la medición de las alturas en pie se utilizó un Hipsómetro haga (los árboles derribados se midieron usando el flexómetro). En cada árbol se registraron las variables siguientes: diámetro normal medido a 1.3 m sobre el nivel del suelo ( $D_n$ , cm), altura total ( $H_t$ , m), diámetros con corteza a

diferentes alturas ( $d$ , cm) y la altura de la sección del fuste respecto al suelo ( $h_m$ , m).

Las dos primeras mediciones se realizaron cada 0.30 m por encima del tocón y la tercera hasta el diámetro normal (1.30 m); posterior a esto, las secciones fueron cortadas de manera constante a 2.54 m de longitud hasta un diámetro de sección específico ubicado en la punta delgada del árbol. Las distintas secciones que tienden a la forma de un cilindro y paraboloides fueron cubizadas por la fórmula de Smalian (1), mientras que para la punta del árbol se utilizó la del cono (2). El volumen de fuste consideró la suma de los volúmenes de las trozas.

$$V_s = \left[ \frac{S_0 + S_1}{2} \right] * L \quad 1$$

$$V_p = \frac{S_0 * H_0}{3} \quad 2$$

Donde:  $V_s$  = volumen por Smalian ( $m^3$ );  $S_0$  y  $S_1$  ( $cm^2$ ) = áreas de las secciones transversales de la troza;  $L$  = longitud de la troza (m);  $V_p$  = volumen de la última sección del árbol (punta del árbol) ( $m^3$ );  $S_0$  = área de la base de la última sección del árbol ( $cm^2$ );  $H_0$  = longitud de la última sección del árbol (m).

A continuación, se muestran las variables utilizadas para llevar a cabo el ajuste del sistema compatible (Tabla 2).

**Tabla 1.** Características silvícolas y biológicas de las áreas de estudio

Entidad federativa	Tipo de bosques	Edad promedio (años)	Superficie (%)	Clima	Suelo
Guerrero	Irregular	43	0.46		
Hidalgo	Irregular	70	6.95		
Jalisco	Irregular	51	0.33		
Estado y Ciudad de México	Irregular	49	28.81	Semicálidos ((A)C), templado subhúmedo C(w), templado (C), semifrío (Cb) y frío (E(T))	Suelos profundos y someros (textura limo-arenosa, arcillo-arenosa o arenosa)
Michoacán	Irregular	37	14.96		
Puebla	Irregular	49	10.51		
Tlaxcala	Irregular	48	6.91		
Veracruz	Irregular	22	3.31		

**Tabla 2.** Estadísticas descriptivas de las variables analizadas

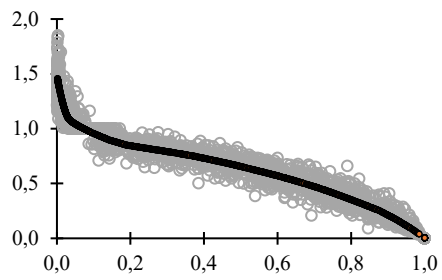
Entidades federativas	No. de árboles	UMAFOR	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación estándar
<b>Diámetro normal (Dn, cm)</b>						
Guerrero	162	1203	8.15	27.71	70.00	14.50
Hidalgo	180	1303	8.60	37.35	64.00	11.27
Jalisco	52	1404	8.50	36.73	70.00	16.17
	49	1406	9.00	44.75	70.00	13.55
Estado y Ciudad de México	52	1410	9.70	41.01	79.00	16.60
	133	1503	8.75	44.95	85.50	22.71
	84	1507	8.00	49.15	90.25	22.38
	151	1508	8.95	45.94	86.50	20.32
Michoacán	135	1510	7.75	34.32	79.50	19.06
	142	1604	13.00	40.91	72.50	12.95
	108	1605	9.00	38.31	74.50	13.69
	148	1607	7.75	31.52	91.65	16.13
Puebla	133	1608	7.75	42.70	88.15	19.05
	148	2101	7.95	42.61	94.50	22.35
	175	2105	5.40	40.58	94.00	21.07
Tlaxcala	156	2108	9.05	41.81	83.20	19.04
	205	2901	8.50	28.10	62.30	13.91
Veracruz	97	2902	7.60	30.44	79.00	15.03
	150	3004	8.20	29.55	52.00	9.67
	148	3012	12.20	33.48	97.00	13.19
<b>Altura (At, m)</b>						
Guerrero	162	1203	7.62	21.56	44.80	7.97
Hidalgo	180	1303	9.50	31.83	43.30	6.68
Jalisco	52	1404	7.26	23.45	39.06	8.92
	49	1406	9.70	28.65	36.72	5.00
Estado y Ciudad de México	52	1410	10.88	26.06	37.59	6.56
	133	1503	7.20	28.72	52.46	11.11
	84	1507	7.81	30.55	50.50	10.19
	151	1508	10.80	27.86	44.55	9.11
Michoacán	135	1510	10.51	21.13	50.00	6.14
	142	1604	13.83	28.27	46.27	6.43
	108	1605	9.80	24.16	39.55	5.60
	148	1607	10.12	26.54	41.30	7.84
	133	1608	6.60	26.68	45.40	9.68

Entidades federativas	No. de árboles	UMAFOR	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación estándar
Puebla	148	2101	7.33	26.47	50.17	9.35
	175	2105	6.10	26.37	41.30	8.75
	156	2108	9.87	26.98	40.56	7.86
Tlaxcala	205	2901	5.13	17.89	40.57	9.13
	97	2902	6.27	21.03	37.25	8.03
Veracruz	150	3004	7.30	16.50	25.40	3.60
	148	3012	8.25	18.30	32.92	4.83
<b>Volumen (Vol, m<sup>3</sup>)</b>						
Guerrero	162	1203	0.02	0.96	6.34	1.16
Hidalgo	180	1303	0.03	1.88	5.73	1.17
Jalisco	52	1404	0.02	1.74	6.00	1.68
	49	1406	0.03	2.42	5.72	1.37
	52	1410	0.04	1.94	5.94	1.54
Estado y Ciudad de México	133	1503	0.03	3.20	11.43	3.09
	84	1507	0.02	3.52	11.31	2.93
	151	1508	0.04	2.95	11.03	2.50
	135	1510	0.02	1.39	7.19	1.67
Michoacán	142	1604	0.08	2.12	8.79	1.49
	108	1605	0.04	1.62	7.30	1.37
	148	1607	0.04	1.28	9.09	1.53
	133	1608	0.02	2.34	13.52	2.36
Puebla	148	2101	0.03	2.48	10.66	2.76
	175	2105	0.01	2.33	12.25	2.41
	156	2108	0.03	2.40	9.34	2.17
Tlaxcala	205	2901	0.02	0.98	5.14	1.19
	97	2902	0.03	1.22	5.56	1.32
Veracruz	150	3004	0.02	0.65	1.97	0.44
	148	3012	0.05	0.98	10.87	1.22

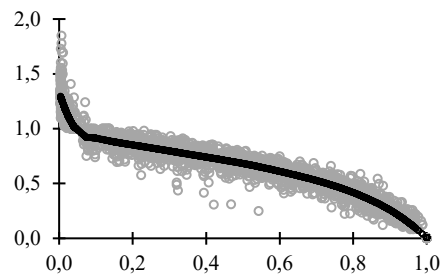
## Descripción del perfil de los árboles

Para una mayor comprensión de los datos, se describió el perfil de los árboles mediante el diámetro relativo ( $d/D$ , cm) y la altura relativa ( $hm/H$ , m) (Figura 1). De igual forma, se realizó el ajuste local

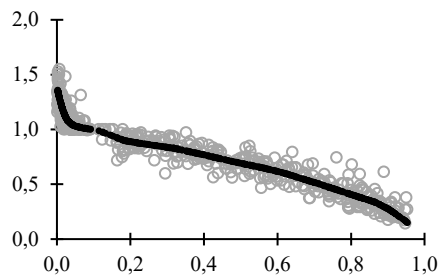
cuadrático no paramétrico a través de la regresión local LOESS o LOWESS del paquete estadístico SAS, con un parámetro suavizado de 0.3. Más tarde, los residuales fueron divididos en diez intervalos de altura relativa para observar el comportamiento de los datos (López-Martínez *et al.*, 2020).



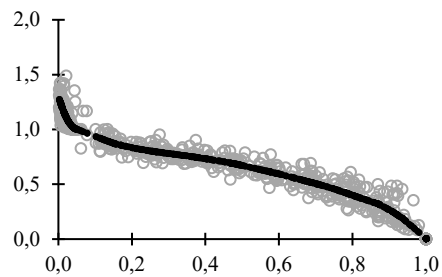
**A**



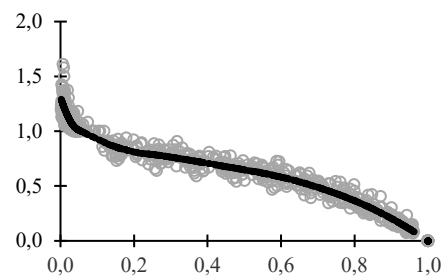
**B**



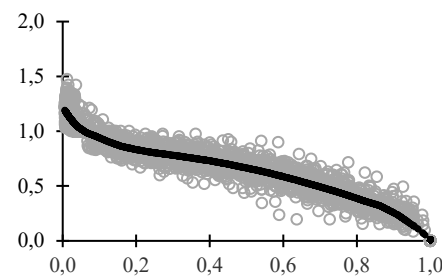
**C**



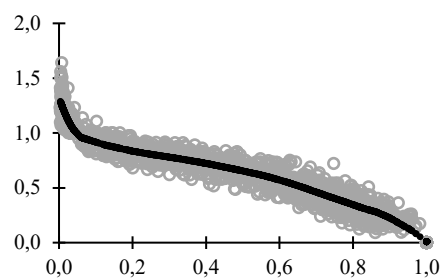
**D**



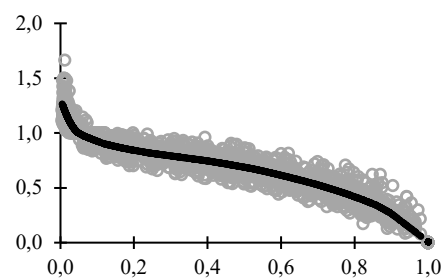
**E**



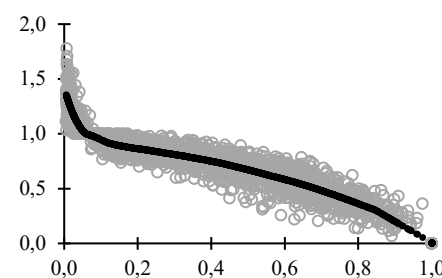
**F**



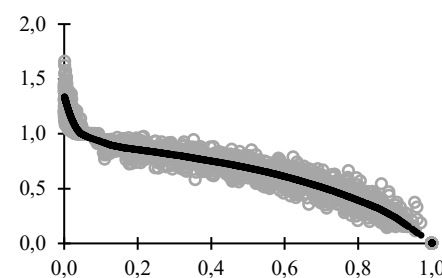
**G**



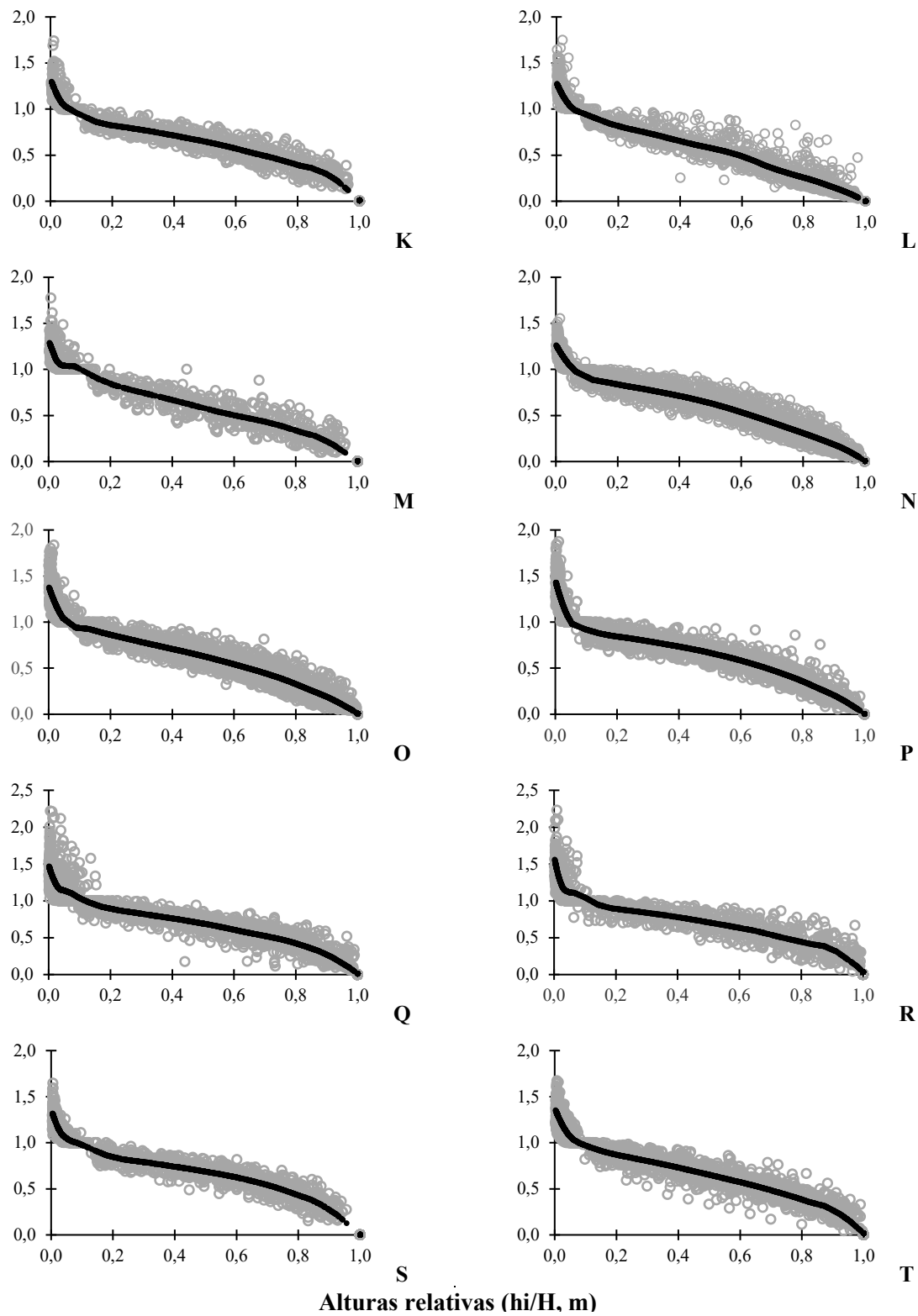
**H**



**I**



**J**



**Figura 1.** Alturas relativas contra diámetros relativos de las UMAFOR: A=1203; B=1303; C=1404; D=1406; E=1410; F=1503; G=1507; H=1508; I=1510; J=1604; K=1605; L=1607; M=1608; N=2101; O=2105; P=2108; Q=2901; R=2902; S=3004; T=3012.

## Ajuste del sistema

El modelo ajustado fue el de [Fang et al. \(2000\)](#), para describir el perfil del árbol o ahusamiento (3), así como para estimar el volumen comercial (4) por UMAFOR. La función es de tipo polinomial segmentada, está integrada por ecuaciones injertadas y, además, cumple la condición de que  $h=H$ , cuando  $d=0$ , como se muestra a continuación:

$$d = C_1 \sqrt{H^{\frac{k-b_1}{b_1}} (1-q)^{\frac{k-b}{b}} \alpha_1^{1+l_2} \alpha_2^{l_2}}$$

donde  $\begin{cases} l_1=1 & \text{si } p_1 \leq q \leq p_2; \text{ de lo contrario } 0 \\ l_2=2 & \text{si } p_2 \leq q \leq 1; \text{ de lo contrario } 0 \end{cases}$  3

$$b = b_1^{1-(l_1+l_2)} b_2^{l_1} b_3^{l_2} \quad \alpha_1 = (1-p_1)^{\frac{(b_2-b_1)k}{b_1 b_2}}$$

$$\alpha_2 = (1-p_2)^{\frac{(b_3-b_2)k}{b_2 b_3}}$$

$$r_0 = (1-h_b/H)^{\frac{k}{b_1}} \quad r_1 = (1-p_1)^{\frac{k}{b_1}} \quad r_2 = (1-p_2)^{\frac{k}{b_2}}$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{\alpha_0 D^{\alpha_1} H^{\alpha_2 \frac{K}{b_1}}}{b_1(r_0-r_1)+b_2(r_1-\alpha_1 r_2)+b_3 \alpha_1 r_2}}$$
 4

$$Vc = C_1^2 H^{\frac{k}{b_1}} \left[ \frac{b_1 r_0 + (l_1+l_2) + (b_1-b_2)r_1 + l_2}{(b_3-b_2)\alpha_1 r_2 - b(1-q)^{\frac{k}{b}} \alpha_1^{1+l_2} + \alpha_1^{l_2}} \right]$$

Donde: D = diámetro normal (cm); D = diámetro a la altura h (m) desde el nivel del tocón (cm); H = altura total del árbol (m);  $h_b$  = altura del tocón (m); Vc = volumen comercial variable ( $m^3$ );  $k = \pi/40000$ ;  $q = h_i/H$ ;  $\alpha_i$ ,  $b_i$ ,  $p_i$  = parámetros a ser estimados.

## Método y bondad de ajuste

Se utilizó el procedimiento MODEL de SAS ([SAS Institute Inc, 2008](#)) para la estimación de los parámetros. A través del método de regresión

aparentemente no relacionada (RAN) se realizó el ajuste en forma simultánea para minimizar errores de los parámetros.

La eficiencia del modelo para cada UMAFOR se midió mediante los siguientes criterios:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1-R^2) \left[ \frac{n-1}{n-p-1} \right]$$
 5

$$REMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-p}}$$
 6

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n}$$
 7

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)}{n}$$
 8

Donde: SCR = Suma de Cuadrado del Error;  $R^2$  = coeficiente de determinación; p = número de parámetros a estimar; n = es el tamaño de muestra; ln = logaritmo natural;  $Y_i$  = valores observados;  $\hat{Y}_i$  = valores predichos.

De manera adicional se realizó un análisis gráfico de los residuos frente a los valores predichos del volumen, ya que es una forma eficiente de evaluar la capacidad de ajuste de un modelo ([Guzmán-Santiago et al., 2019](#)).

## Corrección de heterocedasticidad

La heterocedasticidad en las funciones volumétricas ocurre porque la varianza en el volumen del árbol crece con las variables explicativas, por lo que se realizó la corrección aplicando una ponderación con los mismos pesos a la inversa de la varianza de cada observación para garantizar las estimaciones de los parámetros. La varianza desconocida se estimó con la función potencial  $\sigma_2^2 = Y * X^k$ . Los valores de Y y del exponente k se optimizaron empleando los errores del modelo ajustado sin pesos como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error.

Finalmente, el peso considerado fue  $\frac{1}{D^2} * H$  para la ecuación de volumen rollo total árbol.

### Análisis de los cuerpos dendrométricos

La flexibilidad del modelo permitió analizar los diferentes segmentos del fuste de los árboles utilizando el siguiente criterio, que consiste en partir de un cuerpo geométrico con una base circular, cuyo valor está dado por  $d_i$  en cm y la altura definida por  $h$  en m:

$$V = ff_i \frac{\pi}{40000} * d_i^2 * h \quad 9$$

Donde:  $ff$  define el tipo del cuerpo dendrométrico, es decir, cuando  $ff \sim 1$  es un cilindro; si  $ff = 0.50$  se tiene un paraboloides; cuando  $ff = 0.33$  es un cono; y si  $ff = 0.25$  es un neiloide. En este sentido, el parámetro  $B_i$  del modelo calcula cada segmento y se obtiene de esta manera:

$$\beta_i = ff_i \frac{\pi}{40000} \quad 10$$

En consecuencia, se deriva la siguiente expresión para calcular los diferentes puntos del fuste:

$$ff_i = \beta_i \frac{40000}{\pi} \quad 11$$

Por último, la fórmula que se muestra a continuación permitió calcular el coeficiente de forma con base al promedio  $B_i$ , aplicable para el modelo de volumen.

$$\bar{ff} = \beta_i \frac{40000}{\pi} \quad 12$$

## RESULTADOS

### Bondad de ajuste entre las UMAFOR

Como se vio en la [Tabla 2](#), los estimadores de cada parámetro fueron reportados con sus respectivas

UMAFOR en la forma simultánea, así como la bondad de ajuste generada (ahusamiento, volumen de fuste, volumen comercial, volumen de ramas, volumen total) que resultó altamente significativa ( $P < 0.0001$ ), lo cual mostró que las variables independientes explicaron más del 97 % del volumen comercial y del ahusamiento. En ambas variables se generaron valores convincentes para describir los conjuntos de datos, evidenciados en el resto de las bondades de ajuste ( $\bar{e}$ , REMC y CIA).

### Factores de forma entre las UMAFOR

Se obtuvieron resultados con formas geométricas muy semejantes, donde la mayoría se aproximaron del neiloide (tocón) al paraboloides (fuste central) y que ocurren a distintas secciones del fuste ([Tabla 3](#)). Por ejemplo, en la UMAFOR 2902 los árboles mostraron un factor de forma donde  $ff_1 = 0.06$  ( $b_1$ ), que tiende al neiloide (arriba del primer punto de inflexión), seguida por la sección media con  $ff_2 = 0.47$  ( $b_2$ ), muy próximo a ser un paraboloides, y la sección superior del fuste ( $ff_3 = 0.64$  ( $b_3$ )) pasa por un paraboloides que tiende aproximarse a un cilindro.

Los casos con valores más bajos en los dos puntos de inflexión ( $p_1, p_2$ ) se dieron para las UMAFOR 1508 (H) con valores de 3.5 % a 8.3 %, 2105 (O) con 1.7 % y 4.1 %, y 3004 (S), que mostró 2.7 % a 14 %, ocurriendo cerca de la base del árbol; excepto para el  $p_2$  de la UMAFOR (S), al ser levemente superior por la unidad de manejo 1605 y 1510. Por el contrario, las zonas con valores más altos para el primer punto fueron las 2101, 1406 (5.8 %) y 1410 (6.9 %). Por otra parte, los primeros valores de  $p_1$  (4.4 % y 4.8 %) fueron similares en las UMAFOR 1404 (C) y 1507 (G) que, sin embargo, arrojaron el segundo punto de inflexión más alto ( $p_2 = 90$  %), describiendo así el cambio geométrico de un neiloide a un cilindro a pesar de que proceden de distintas entidades federativas.

**Tabla 3.** Estimadores de los parámetros y bondad de ajuste del modelo compatible

UMAFOR	Parámetro	Estimación de parámetros	Error estándar	Valor t	Aprox Pr >  t	Factor de forma promedio	Vc (volumen comercial)			d (diámetro)				
							CIA	Sesgo (m <sup>3</sup> )	REMC (m)	R <sup>2</sup> adj	CIA	Sesgo (cm)	REMC (cm)	R <sup>2</sup> adj
1203	a <sub>0</sub>	0.00005400	0.00000192	28.31	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.68658000	0.01167550	144.45	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	1.20751600	0.01537038	78.56	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000400	0.00000009	45.87	<0.0001	0.3055	1727.75	0.00002	0.11	0.99	22921.03	-0.1221	2.54	0.98
	b <sub>2</sub>	0.00003600	0.00000038	95.97	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003200	0.00000067	48.73	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.04508000	0.00101022	44.62	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.65388700	0.04404292	14.85	<0.0001										
1303	a <sub>0</sub>	0.00002000	0.00000107	19.00	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.60277600	0.00956422	167.58	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	1.57936800	0.01795778	87.95	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000400	0.00000007	57.83	<0.0001	0.3225	1142.54	0.00075	0.16	0.98	37165.26	-0.0675	2.16	0.98
	b <sub>2</sub>	0.00004000	0.00000023	174.03	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003200	0.00000049	66.01	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.04460000	0.00067803	65.78	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.74983300	0.01254858	59.75	<0.0001										
1404	a <sub>0</sub>	0.00012300	0.00000900	13.68	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.85747900	0.02905067	63.94	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.80094600	0.03496563	22.91	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000021	25.89	<0.0001	0.3565	5946.73	0.00445	0.19	0.98	63239.54	-0.2854	2.29	0.98
	b <sub>2</sub>	0.00003700	0.00000040	92.25	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00004200	0.00000459	9.05	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.04853800	0.00185216	26.21	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.90203300	0.03663402	24.62	<0.0001										
1406	a <sub>0</sub>	0.00008600	0.00000825	10.44	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.84495000	0.01686188	109.42	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.91292000	0.02891174	31.58	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000700	0.00000029	22.29	<0.0001	0.3437	3874.53	-0.0005	0.14	0.99	11751.91	-0.1928	2.61	0.98
	b <sub>2</sub>	0.00003800	0.00000106	35.94	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003600	0.00000066	55.04	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.05878800	0.00259814	22.63	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.48185800	0.14166453	3.40	0.0007										



UMAFOR	Parámetro	Estimación de parámetros	Error estándar	Valor t	Aprox Pr >  t	Factor de forma promedio	Vc (volumen comercial)			d (diámetro)				
							CIA	Sesgo (m <sup>3</sup> )	REMC (m)	R <sup>2</sup> adj	CIA	Sesgo (cm)	REMC (cm)	R <sup>2</sup> adj
1410	a <sub>0</sub>	0.00004100	0.00000368	11.18	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.70842500	0.01438439	118.77	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	1.26919100	0.03004534	42.24	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000700	0.00000028	67.10	<0.0001	0.3225	1587.44	0.00238	0.14	0.99	13509.51	-0.1942	2.15	0.99
	b <sub>2</sub>	0.00003800	0.00000057	24.83	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003100	0.00000069	44.51	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.06961900	0.00295815	23.53	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.66094700	0.02357689	28.03	<0.0001										
1503	a <sub>0</sub>	0.00009300	0.00000401	23.30	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.73589800	0.01469059	118.16	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	1.01587900	0.01837714	55.28	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000600	0.00000016	35.08	<0.0001	0.3480	1650.92	0.00596	0.32	0.98	13804.78	-0.2071	2.35	0.99
	b <sub>2</sub>	0.00003700	0.00000043	86.53	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003900	0.00000039	100.29	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.04685500	0.00109790	42.68	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.52293800	0.06616724	7.90	<0.0001										
1507	a <sub>0</sub>	0.00012200	0.00000810	15.09	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.78133200	0.01679609	106.06	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.88231700	0.02494533	35.37	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000014	33.71	<0.0001	0.3649	13550.7	-0.0067	0.39	0.98	47007.57	-0.2269	2.71	0.99
	b <sub>2</sub>	0.00003400	0.00000025	136.48	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00004700	0.00000277	16.99	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.04462600	0.00108422	41.16	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.90835900	0.00997065	91.10	<0.0001										
1508	a <sub>0</sub>	0.00011300	0.00000522	21.55	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.74578000	0.01214935	143.69	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.95499800	0.01686748	56.62	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000016	32.35	<0.0001	0.2461	8878.69	0.00795	0.29	0.98	30849.91	-0.0998	2.67	0.98
	b <sub>2</sub>	0.00001400	0.00000083	16.59	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003900	0.00000020	192.96	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.03566300	0.00101950	34.98	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.08356800	0.00332998	25.10	<0.0001										

UMAFOR	Parámetro	Estimación de parámetros	Error estándar	Valor t	Aprox Pr >  t	Factor de forma promedio	Vc (volumen comercial)			d (diámetro)				
							CIA	Sesgo (m <sup>3</sup> )	REMC (m)	R <sup>2</sup> adj	CIA	Sesgo (cm)	REMC (cm)	R <sup>2</sup> adj
1510	a <sub>0</sub>	0.00012900	0.00000490	26.23	<0.0001	0.2461	11447.50	-0.0165	0.17	0.98	47086.86	-0.0908	2.55	0.98
	a <sub>1</sub>	1.96004800	0.01262129	155.30	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.62920100	0.01498672	41.98	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000400	0.00000013	30.59	<0.0001									
	b <sub>2</sub>	0.00002000	0.00000099	19.69	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003400	0.00000026	130.54	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.03013600	0.000069690	43.24	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.13700600	0.00851002	16.10	<0.0001										
1604	a <sub>0</sub>	0.00006900	0.00000291	23.64	<0.0001	0.3310	10830.30	0.00017	0.18	0.98	40124.92	-0.1431	2.26	0.98
	a <sub>1</sub>	1.61509100	0.01152570	140.13	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	1.24464000	0.01481613	84.01	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000011	50.36	<0.0001									
	b <sub>2</sub>	0.00003900	0.00000039	98.83	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003400	0.00000044	76.74	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.05050500	0.00102015	49.51	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.59689400	0.02402229	24.85	<0.0001										
1605	a <sub>0</sub>	0.00004700	0.00000314	14.97	<0.0001	0.2631	4752.64	-0.001	0.24	0.96	39732.76	-0.1763	2.21	0.98
	a <sub>1</sub>	1.90290500	0.02054328	92.63	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	1.02109000	0.02825924	36.13	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000600	0.00000023	25.77	<0.0001									
	b <sub>2</sub>	0.00001700	0.00000144	11.49	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003900	0.00000032	123.06	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.03935700	0.00164531	23.92	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.12058000	0.01028651	11.72	<0.0001										
1607	a <sub>0</sub>	0.00010200	0.00000520	19.53	<0.0001	0.2843	2734.37	-0.0174	0.13	0.98	26804.75	-0.2656	2.19	0.98
	a <sub>1</sub>	2.03071300	0.00593717	34.03	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.61666000	0.01423654	43.32	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000600	0.00000018	33.23	<0.0001									
	b <sub>2</sub>	0.00002800	0.00000043	64.40	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003300	0.00000045	74.07	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.04637500	0.00138493	33.49	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.45234100	0.02800635	16.15	<0.0001										

UMAFOR	Parámetro	Estimación de parámetros	Error estándar	Valor t	Aprox Pr>  t	Factor de forma promedio	Vc (volumen comercial)			d (diámetro)			
							CIA	Sesgo (m <sup>3</sup> )	REMC (m)	R <sup>2</sup> adj	CIA	Sesgo (cm)	REMC (cm)
1608	a <sub>0</sub>	0.00003400	0.00000258	13.23	<0.0001								
	a <sub>1</sub>	1.80838800	0.02452088	73.35	<0.0001								
	a <sub>2</sub>	1.19402000	0.03258579	36.64	<0.0001								
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000019	28.63	<0.0001								
	b <sub>2</sub>	0.00002900	0.00000041	70.31	<0.0001	0.3098	3089.93	-0.0011	0.40	0.96	39872.46	-0.0909	3.14
	b <sub>3</sub>	0.00003900	0.00000080	48.17	<0.0001								
	p <sub>1</sub>	0.04074000	0.00122537	33.25	<0.0001								
p <sub>2</sub>	0.57724100	0.01721642	33.35	<0.0001									
2101	a <sub>0</sub>	0.00007200	0.00000241	29.65	<0.0001								
	a <sub>1</sub>	1.87013300	0.01149334	162.71	<0.0001								
	a <sub>2</sub>	0.90991400	0.01455943	62.50	<0.0001								
	b <sub>1</sub>	0.00000600	0.00000011	53.87	<0.0001								
	b <sub>2</sub>	0.00003400	0.00000034	98.94	<0.0001	0.3013	5479.19	0.0007	0.34	0.98	26213.63	-0.1169	2.04
	b <sub>3</sub>	0.00003100	0.00000030	101.25	<0.0001								
	p <sub>1</sub>	0.05809600	0.00101663	57.15	<0.0001								
p <sub>2</sub>	0.53368900	0.02501355	21.34	<0.0001									
2105	a <sub>0</sub>	0.00003000	0.00000134	22.31	<0.0001								
	a <sub>1</sub>	1.85548600	0.00883926	209.91	<0.0001								
	a <sub>2</sub>	1.19034200	0.01709668	69.62	<0.0001								
	b <sub>1</sub>	0.00000300	0.00000006	39.62	<0.0001	0.1697	17363.00	-0.0008	0.22	0.99	60299.22	0.1103	2.75
	b <sub>2</sub>	0.00000600	0.00000029	20.04	<0.0001								
	b <sub>3</sub>	0.00003100	0.00000014	219.39	<0.0001								
	p <sub>1</sub>	0.01796000	0.00049859	36.02	<0.0001								
p <sub>2</sub>	0.04109200	0.00107773	38.13	<0.0001									
2108	a <sub>0</sub>	0.00004400	0.00000225	19.43	<0.0001								
	a <sub>1</sub>	1.47526300	0.01191746	123.79	<0.0001								
	a <sub>2</sub>	1.53566900	0.01999331	76.81	<0.0001								
	b <sub>1</sub>	0.00000300	0.00000006	61.79	<0.0001	0.2970	15044.40	0.00155	0.27	0.98	64513.14	-0.178	2.74
	b <sub>2</sub>	0.00003700	0.00000026	138.91	<0.0001								
	b <sub>3</sub>	0.00003000	0.00000060	50.29	<0.0001								
	p <sub>1</sub>	0.04142100	0.00063699	65.03	<0.0001								
p <sub>2</sub>	0.73978400	0.01484714	49.83	<0.0001									

UMAFOR	Parámetro	Estimación de parámetros	Error estándar	Valor t	Aprox Pr >  t	Factor de forma promedio	Vc (volumen comercial)			d (diámetro)				
							CIA	Sesgo (m <sup>3</sup> )	REMC (m)	R <sup>2</sup> adj	CIA	Sesgo (cm)	REMC (cm)	R <sup>2</sup> adj
2901	a <sub>0</sub>	0.00007700	0.00000293	26.44	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.81754300	0.01291949	140.68	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.99723000	0.01181764	84.38	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000014	31.96	<0.0001	0.2334	11700.5	-0.0020	0.12	0.99	51259.77	-0.1576	2.52	0.98
	b <sub>2</sub>	0.00001100	0.00000091	12.06	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003900	0.00000024	163.12	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.03128400	0.00130522	23.97	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.07440800	0.00395228	18.83	<0.0001										
2902	a <sub>0</sub>	0.00010300	0.00000831	12.42	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.76736600	0.01789997	98.74	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.96692200	0.02877671	33.60	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000019	26.84	<0.0001									
	b <sub>2</sub>	0.00003700	0.00000048	76.72	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00005100	0.00000175	29.08	<0.0001	0.3947	18850.1	-0.0031	0.21	0.97	45063.94	-0.272	3.21	0.96
	p <sub>1</sub>	0.05168800	0.00176829	29.23	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.81093000	0.01865742	43.46	<0.0001										
3004	a <sub>0</sub>	0.00007300	0.00000418	17.56	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.81715400	0.01418169	128.13	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.99282300	0.02257374	43.98	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000500	0.00000018	28.04	<0.0001	0.2631	-6861.30	-0.0003	0.06	0.98	31806.86	-0.1325	2.10	0.97
	b <sub>2</sub>	0.00001800	0.00000101	17.79	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003900	0.00000029	133.49	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.02717200	0.00097607	27.84	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.14927800	0.00926216	16.12	<0.0001										
3012	a <sub>0</sub>	0.00004600	0.00000184	25.17	<0.0001									
	a <sub>1</sub>	1.97461100	0.01175288	168.01	<0.0001									
	a <sub>2</sub>	0.94387000	0.02102148	44.90	<0.0001									
	b <sub>1</sub>	0.00000700	0.00000019	36.13	<0.0001	0.3225	1775.40	0.00025	0.12	0.99	36563.60	0.066	2.27	0.98
	b <sub>2</sub>	0.00003000	0.00000038	78.59	<0.0001									
	b <sub>3</sub>	0.00003900	0.00000053	72.93	<0.0001									
	p <sub>1</sub>	0.04946000	0.00130393	37.93	<0.0001									
p <sub>2</sub>	0.52357900	0.01678076	31.20	<0.0001										

## DISCUSIÓN

Los resultados generados permiten modelar la relación ahusamiento-volumen de manera simultánea (Guzmán-Santiago *et al.*, 2020b), lo cual minimiza las pérdidas económicas en la estimación de los datos (Özçelik y Göçeri, 2015). Por ello, la técnica RAN o SUR hace posible obtener estimadores más consistentes y, por ende, coeficientes superiores al 97 %, que son respaldados en otros estudios (Vargas-Larreta *et al.*, 2017).

En cuanto a la información reportada por Vargas-Larreta *et al.* (2017) en la plataforma SiBiFor durante 2016, para *A. religiosa* se evidencian buenas estimaciones al tener coeficientes superiores al 96 % ( $R^2$ ) y con una REMC menores a 2.72 cm. Sin embargo, con la calidad de depuración de los datos se logró mejorar los criterios de ajustes ya mencionados, así como de otros añadidos al sistema (CIA y  $\bar{e}$ ) sobre existencias de volúmenes totales. Por otra parte, esta investigación se enriqueció al abordar los factores de forma respecto a las variables estimadas en cada uno de los sitios.

En consecuencia, los resultados muestran árboles con formas geométricas que van de un neiloide a un paraboloides con distintos puntos de inflexión, donde se observa que las podas en forma natural ocurren lentamente en los individuos. De ahí que una práctica de manejo bien desarrollada facilite el crecimiento de árboles con tallos rectos y de forma cilíndrica (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014), lo que sería deseable. Aun así, cabe mencionar que la mayoría de los sitios todavía no cuentan con un programa de manejo forestal, o quizás este se encuentra en trámite.

A pesar de tratarse de una sola especie y una serie de factores, sobre todo ambientales, es importante calcular los puntos de inflexión de las distintas regiones dado que difieren entre sí (Berhe y Arnoldsson, 2008). Lo anterior fue propuesto por López-Martínez *et al.* (2020), quienes investigaron las 11 especies tropicales más importantes del Sureste de México y encontraron resultados similares al explicar más del 94 % sobre la variabilidad en ahusamiento y volumen comercial, así como la tasa de cambios a distintas

alturas con base en las procedencias; por ejemplo, de la especie *Dendropanax arboreus* (L.) Decne. et Planch. encontraron que en las cuatro regiones los primeros puntos de inflexión fueron 6.0 %, 5.7 %, 5.0 % y 7.1 %, mientras que los puntos posteriores indicaron 60 %, 56 %, 57 % y 70 %.

Un resultado parecido se puede observar en el trabajo de Özçelik y Göçeri, (2015) con *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *E. camaldulensis* Dehnh. en la región de Turquía, al explicar más del 97 % sobre la variable volumen, donde los puntos de inflexión ocurren en 3.6 % y 6.4 % de la altura del árbol, siendo similar a lo encontrado por Sakici *et al.* (2008) para *Abies* sp en la misma región. Así mismo, Hernández-Pérez *et al.* (2013) consiguieron ganancias significativas del 97.06 % y 98.09 % en *Pinus patula* Schiede ex Schltld. et Cham., así como puntos de inflexión entre 1.34 % y 82.3 %, y que se asemejan a los resultados de Uranga-Valencia *et al.* (2015) en los valores de  $p_1$  (1.36 %) y  $p_2$  (96.52 %) en un bosque bajo manejo. Cabe resaltar que el primer punto de inflexión es casi imperceptible dado que se da prácticamente a nivel del tocón. Bajo este mismo enfoque también se aprecian las buenas estimaciones que obtuvieron Martínez-Ángel *et al.* (2019) para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen.

Respecto a los resultados de *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México, se presentan puntos de inflexión aproximado de 4.1 % y 4.6 % (Corral-Rivas *et al.*, 2017; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014), que son semejantes para algunas UMAFOR de esta investigación. A su vez, Fang *et al.* (2000) reportaron el 54 % para *Pinus elliotii* Engelm. y 57 % en *P. taeda* L. en plantaciones de los Estados Unidos. Esta misma metodología ha dado buenas estimaciones en diámetros a distintas alturas de *Gmelina arborea* Roxb. en Colombia (Niño-López *et al.*, 2018), *Eucalyptus tereticornis* Smith en Argentina (Milena-López *et al.*, 2015) y *E. nitens* (Deane et Maiden) Maiden en la región de La Araucanía, Chile (Rodríguez-Toro *et al.*, 2016).

Finalmente, a pesar de que no se percibió ninguna transgresión al supuesto de heterocedasticidad

en los datos, se realizó el análisis de corrección, aunque no se encontró mejora en las bondades de ajuste, lo cual se confirma con otros estudios al señalar que en ocasiones no se requiere hacer correcciones (colinealidad, heterocedasticidad y autocorrelación) de las variables ya mencionadas, pues se trata de un modelo segmentado y a veces se pierden ajustes (además de que en la práctica no aporta información de gran relevancia) (Ramírez-Martínez *et al.*, 2018). Es preciso indicar que la varianza no constante en las perturbaciones del modelo es consecuencia de las características biológicas presentes, por lo que no afecta en gran medida durante el ajuste (Prodan *et al.*, 1997).

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para cada UMAFOR mostraron excelentes estimaciones al hacer uso del modelo segmentado con características biológicas, lo cual facilita la descripción del perfil fustal y del volumen comercial a diferentes alturas.

Con este modelo es posible generar un sistema de ecuación que clasifique los tipos de productos para su comercialización.

A través de esta técnica se puede observar la forma del fuste de la especie, así como los efectos que influyen sobre el ahusamiento, pues depende del manejo del rodal.

En la mayoría de los casos las formas geométricas que toman los árboles van de un neiloide a un paraboloide.

Por último, destacar que es el primer modelo con este tipo de estructura que se genera a nivel de las UMAFOR para las ocho entidades federativas, y que sin duda será de utilidad en los inventarios forestales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Benedicto Vargas Larreta, investigador del Instituto Tecnológico de El Salto, Durango, México, por aportar la información

de campo para este trabajo. De igual manera, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico durante el periodo en que los autores fueron estudiantes, entre 2017 y 2020.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

J. C. G.S.: planeación, análisis de la información y redacción del texto; B. V.L.: proporción de los datos de campo y revisión de la información; O. A. A.C., M. G.C., H. M. D.S.P. y G. Q.B.: revisión del documento.

## REFERENCIAS

- Azevêdo, T. K. B., Paes, J. B., Calegari, L. y Nascimento, J. W. B. (2014). Relações entre volume e massa da madeira e casca de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*). *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(1), 97-102. <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i1a3066>
- Berhe, L. y Arnoldsson, G. (2008). Tree taper models for *Cupressus lusitanica* plantations in Ethiopia. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 70(3), 193-203. <https://doi.org/10.2989/SF.2008.70.3.2.663>
- Burkhardt, H. y Tomé, H. (2012). *Modeling forest trees and stands*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
- Corral-Rivas, J. J., Vega-Nieva, D. J., Rodríguez-Soalleiro, R., López-Sánchez, C. A., Wehenkel, C., Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J. G. y Ruiz-González, A. D. (2017). Compatible system for predicting total and merchantable stem volume over and under bark, branch volume and whole-tree volume of pine species. *Forests*, 8(11), 417. <https://doi.org/10.3390/f8110417>

- Cruz-Cobos, F., Mendía-Santana, R., Jiménez-Flores, A. A., Nájera-Luna, J. A. y Cruz-García, F.** (2016). Ecuaciones de volumen para *Arbutus spp.* (madroño) en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*, 24(68), 41-47.
- Demaerschalk, J. P.** (1972). Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science*, 18(3), 241-245.  
<https://doi.org/10.1093/forestscience/18.3.241>
- Diéguez-Aranda, U., Castedo-Dorado, F., Barrio-Anta, M., Álvarez-González, J. G., Rojo-Alboreca, A. y Ruiz-González, A. D.** (2005). *Prácticas de Dasonetría*. Mundi-Prensa.  
<http://www.untumbes.edu.pe/vcs/biblioteca/document/varioslibros/1480.%20Pr%C3%A1cticas%20de%20dasometr%C3%ADa.pdf>
- Fang, Z., Borders, B. E. y Bailey, R. L.** (2000). Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. *Forest Science*, 46(1), 1-12.
- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Vargas-Larreta, B. y De los Santos-Posadas, H. M.** (2019). Relación altura-diámetro para *Abies religiosa* Kunth Schltdl. & Cham. en el centro y sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52), 99-120.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i52.483>
- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A. y Vargas-Larreta, B.** (2020a). Forest volume estimation techniques with special emphasis on the tropics. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(2), 291-306.  
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.07.061>
- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J. y Vargas Larreta, B.** (2020b). Estimación de volumen de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en diferentes entidades federativas de México. *Colombia Forestal*, 23(2), 99-113.  
<https://doi.org/10.14483/2256201X.15557>
- Hernández-Pérez, D., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Valdez-Lazalde, J. R. y Volke-Haller, V. H.** (2013). Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(16), 34-45.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i16.439>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [México].** (2017). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Capa Unión*  
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463173359>
- Kozak, A.** (1988). A variable-exponent taper equation. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(11), 1363-1368.  
<https://doi.org/10.1139/x88-213>
- López-Martínez, J. O., Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., Aguirre-Calderón, C. G., Macario-Mendoza, P. A., Martínez-Salvador, M. y Álvarez-González, J. G.** (2020). Compatible taper-volume systems for major tropical species in Mexico. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 93(1), 56-74.  
<https://doi.org/10.1093/forestry/cpz033>
- Martínez-Ángel, L., De los Santos-Posadas, H. M., Fierros-González, A. M., Cruz-Cobos, F. y Quiñonez-Barraza, G.** (2019). Funciones compatibles de ahusamiento y volumen en una plantación forestal comercial de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen en Tlatlauquitepec, Puebla. *Agrociencia*, 53(3), 381-401.
- Milena-López, A. M., Barrios, A. y Trincado, G.** (2015). Modelos de perfiles fustales con una estructura de error autorregresiva para plantaciones de *Eucalyptus tereticornis* en Colombia. *Madera y Bosques*, 21(2), 73-88.  
<https://doi.org/10.21829/myb.2015.212446>
- Niño-López, G. S., Ramos-Molina, P. A., Barrios, A. y López-Aguirre, A. M.** (2018). Modelos compatibles de ahusamiento-volumen para árboles de *Gmelina arborea* Roxb. en el Alto Magdalena, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(2), 174-187.  
<https://doi.org/10.14483/2256201X.12249>
- Özçelik, R. y Göçeri, M. F.** (2015). Compatible merchantable stem volume and taper equations for

*Eucalyptus sp.* plantations in the Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(6), 851-863.

<https://doi.org/10.3906/tar-1501-27>

**Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P.** (1997). *Mensura Forestal* (Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

<http://repiica.iica.int/docs/B4179e/B4179e.pdf>

**Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas, H. M., Álvarez-González, J. G. y Velázquez-Martínez, A.** (2014). Compatible taper and merchantable volume system for major pine species in Durango, Mexico. *Agrociencia*, 48(5), 553-567.

**Ramírez-Martínez, A., Santiago-García, W., Quiñonez-Barraza, G., Ruiz-Aquino, F. y Antúnez, P.** (2018). Modelación del perfil fustal y volumen total para *Pinus ayacahuite* Ehren. *Madera y Bosques*, 24(2), 1-15.

<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421496>

**Rodríguez-Toro, A., Rubilar-Pons, R., Muñoz-Sáez, F., Cártes-Rodríguez, E., Acuña-Carmona, E. y Cancino-Cancino, J.** (2016). Modelo de ahusamiento para *Eucalyptus nitens*, en suelos de cenizas volcánicas de la región de La Araucanía (Chile). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 48(1), 101-114.

**Sakici, O. E., Misir, N., Yavuz, H. y Misir, M.** (2008). Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(6), 522-533.

<https://doi.org/10.1080/02827580802552453>

**SAS Institute Inc.** (2008). *Statistical Analysis System (SAS/STAT)* (Versión 9.2) [Software de computador]. SAS Institute Inc.

[https://www.sas.com/en\\_us/software/stat.html](https://www.sas.com/en_us/software/stat.html)

**Schumacher, F. X. y Hall, F. S.** (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal Agriculture Research*, 47(9), 719-734.

**SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [México].** (2016). *Anuario estadístico de la producción forestal*.

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/282951/2016.pdf>

**Tamarit-Urías, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Aldrete, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ramírez-Maldonado, H. y Guerra De la Cruz, V.** (2014). Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(21), 58-74.

**Uranga-Valencia, L. P., De los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., López-Upton, J. y Navarro-Garza, H.** (2015). Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencia*, 49(7), 787-801.

**Urbano, E., Machado, S. A., Figueiredo-Filho, A., Sanquetta, C. R. y Zea-Camaño, J. D.** (2018). Modelación del volumen de rodal para especies secundarias en bosques nativos de *Mimosa scabrella* en la región metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. *Bosque*, 39(2), 227-237.

<https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000200227>

**Valencia-Manzo, S., Trujillo-Gómez, S. A., Cornejo-Oviedo, E. H., Flores-López, C., Díaz-Balderas, J. A. y González-López, H. D.** (2017). Ecuación de pressler para estimar volumen de fuste en árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham. var. *longepedunculata* Look. *Foresta Veracruzana*, 19(1), 29-34.

**Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., Treviño-Garza, E. J., Martínez-Salvador, M. y Aguirre-Calderón, C. G.** (2017). SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437-455.

<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040>







## DECLARACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS EDITORIALES Y NORMAS ÉTICAS DE COLOMBIA FORESTAL

“Esta declaración ha sido adaptado del documento para procedimientos y estándares éticos elaborado por *Cambridge University Press*, siguiendo las directrices para un buen comportamiento ético en publicaciones científicas seriadas del *Committee on Publication Ethics (COPE)*, *International Committee of Medical Journal Editors (ICJME)* y *World Association of Medical Editors (WAME)*”

### Responsabilidades de los editores

- Actuar de manera balanceada, objetiva y justa sin ningún tipo de discriminación sexual, religiosa, política, de origen, o ética de los autores, haciendo correcto uso de las directrices pronunciadas en la Constitución Política de Colombia en este aspecto.
- Considerar, editar y publicar las contribuciones académicas únicamente por sus méritos académicos sin tomar en cuenta ningún tipo de influencia comercial o conflicto de interés.
- Acoger y seguir los procedimientos adecuados para resolver posibles quejas o malentendidos de carácter ético o de conflicto de interés. El editor y el comité editorial actuarán en concordancia con los reglamentos, políticas y procedimientos establecidos por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y particularmente en el Acuerdo 023 de junio 19 de 2012 del Consejo Académico, por el cual se reglamenta la política editorial de la Universidad y la normatividad vigente en el tema en Colombia. En todo caso se dará a los autores oportunidad para responder ante posibles conflictos de interés. Cualquier tipo de queja debe ser sustentada con documentación y soportes que comprueben la conducta inadecuada.

### Responsabilidades de los revisores

- Contribuir de manera objetiva al proceso de evaluación de los manuscritos sometidos a consideración en la revista Colombia Forestal colaborando, en forma oportuna, con la mejora en la calidad científica de estos productos originales de investigación.
- Mantener la confidencialidad de los datos suministrados por el editor, el comité editorial o los autores, haciendo correcto uso de dicha información por los medios que le sean provistos. No obstante, es su decisión conservar o copiar el manuscrito en el proceso de evaluación.
- Informar al editor y al comité editorial, de manera oportuna, cuando el contenido de una contribución académica presente elementos de plagio o se asemeje sustancialmente a otros productos de investigación publicados o en proceso de publicación.
- Informar cualquier posible conflicto de intereses con una contribución académica por relaciones financieras, institucionales, de colaboración o de otro tipo entre el revisor y los autores. Para tal caso, y si es necesario, retirar sus servicios en la evaluación del manuscrito.

### Responsabilidades de los autores

- Mantener soportes y registros precisos de los datos y análisis de datos relacionados con el manuscrito presentado a consideración de la revista. Cuando el editor o el comité editorial de la revista requieran esta información (por motivos razonables) los autores deberán suministrar o facilitar el acceso a esta. Al momento de ser requeridos, los datos originales entrarán

en una cadena de custodia que asegure la confidencialidad y protección de la información por parte de la revista.

- Confirmar mediante una carta de originalidad (formato preestablecido por la revista) que la contribución académica sometida a evaluación no está siendo considerada ò ha sido sometida y/ò aceptada en otra publicación. Cuando parte del contenido de esta contribución ha sido publicado o presentado en otro medio de difusión, los autores deberán reconocer y citar las respectivas fuentes y créditos académicos. Además, deberán presentar copia al editor y al comité editorial de cualquier publicación que pueda tener contenido superpuesto o estrechamente relacionado con la contribución sometida a consideración. Adicionalmente, el autor debe reconocer los respectivos créditos del material reproducido de otras fuentes. Aquellos elementos como tablas, figuras o patentes, que requieren un permiso especial para ser reproducidas deberán estar acompañadas con una carta de aceptación de reproducción por parte de los poseedores de los derechos de autor del producto utilizado.
- En aquellas investigaciones donde se experimente con animales se deben mantener y asegurar las prácticas adecuadas establecidas en las normas que regulan estas actividades.
- Declarar cualquier posible conflicto de interés que pueda ejercer una influencia indebida en cualquier momento del proceso de publicación.
- Revisar cuidadosamente las artes finales de la contribución, previamente a la publicación en la revista, informando sobre los errores que se puedan presentar y deban ser corregidos. En caso de encontrar errores significativos, una vez publicada la contribución académica, los autores deberán notificar oportunamente al editor y al comité editorial, cooperando posteriormente con la revista en la publicación de una fe de erratas, apéndice, aviso, corrección,

o en los casos donde se considere necesario retirar el manuscrito del número publicado.

## **Responsabilidad de la Universidad Distrital**

- La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en cuyo nombre se publica la revista Colombia Forestal y siguiendo lo estipulado en el Acuerdo 023 de junio 19 de 2012 del Consejo Académico, por el cual se reglamenta la Política Editorial de la Universidad, se asegurará que las normas éticas y las buenas prácticas se cumplan a cabalidad.

## **Procedimientos para tratar un comportamiento no ético**

### *Identificación de los comportamientos no éticos*

- El comportamiento no ético por parte de los autores del cual tengan conocimiento o sea informada la revista, serán examinados en primera instancia por el Editor y el Comité Editorial de la revista.
- El comportamiento no ético puede incluir, pero no necesariamente limitarse, a lo estipulado en la declaración de buenas prácticas y normas éticas de la revista Colombia Forestal, la reglamentación de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en esta materia.
- La información sobre un comportamiento no ético, debe hacerse por escrito y estar acompañada con pruebas tangibles, fiables y suficientes para iniciar un proceso de investigación. Todas las denuncias deberán ser consideradas y tratadas de la misma manera, hasta que se adopte una decisión o conclusión exitosa.
- La comunicación de un comportamiento no ético debe informarse en primera instancia preferiblemente al editor de la revista, en consecuencia al comité editorial o al comité de publicaciones de la Facultad del Medio Ambiente. En aquellos

casos donde los anteriores actores no den respuesta oportuna, deberá informarse el comportamiento no ético al comité de publicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- La queja sobre un comportamiento no ético por parte del Editor o el Comité Editorial de la revista deberá ser informado ante el comité de publicaciones de la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital.

### *Investigación*

- La primera decisión debe ser tomada por el editor, quien debe consultar o buscar el asesoramiento del Comité Editorial y el Comité de Publicaciones de la Facultad del Medio Ambiente, según el caso.
- Las evidencias de la investigación serán mantenidas en confidencialidad.
- Un comportamiento no ético, que el Editor considere menor, puede ser tratado entre él y los autores sin necesidad de consultas adicionales. En todo caso, los autores deben tener la oportunidad de responder a las denuncias realizadas por comportamiento no ético.
- Un comportamiento no ético de carácter grave se debe notificar a las entidades de afiliación institucional de los autores o que respaldan la investigación. El editor, en consideración con la Universidad Distrital, debe tomar la decisión de si debe o no involucrar a los patrocinadores, ya sea mediante el examen de la evidencia disponible o mediante nuevas consultas con un número limitado de expertos.

### *Resultados (en orden creciente de gravedad, podrán aplicarse por separado o en combinación)*

- Informar a los autores o revisores donde parece haber un malentendido o mala práctica de las normas éticas.
- Enviar una comunicación oficial dirigida a los autores o revisores que indique la falta de conducta ética y sirva como precedente para buen comportamiento en el futuro.
- Hacer una notificación pública formal en la que se detalle la mala conducta con base en las evidencias del proceso de investigación.
- Hacer una página de editorial que denuncie de manera detallada la mala conducta con base en las evidencias del proceso de investigación.
- Enviar una carta formal dirigida a las entidades de afiliación institucional de los autores que a su vez respaldan o financian el proceso de investigación.
- Realizar correcciones, modificaciones o de ser necesario retirar el artículo de la publicación de la revista, clausurando los servicios de indexación y el número de lectores de la publicación e informando a la institución de afiliación de los autores y a los revisores esta decisión.
- Realizar un embargo oficial de cinco años al autor, periodo en el cual no podrá volver a publicar en la revista.
- Denunciar el caso y el resultado de la investigación ante las autoridades competentes, en caso que el buen nombre de la Universidad Distrital se vea comprometido.



## INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

La revista *Colombia Forestal* publica contribuciones originales en diferentes temáticas del campo forestal y del medio ambiente, con especial énfasis en la República de Colombia. La revista está dirigida a un amplio público a nivel nacional e internacional, especialmente a profesionales directamente relacionados con el manejo de recursos naturales renovables.

### Selección y evaluación de los manuscritos sometidos para publicación

El proceso de evaluación de un manuscrito consta de una preselección y revisión general por el Comité Editorial, seguida de una evaluación doblemente anónima solicitada a pares especialistas en cada tema. Una vez realizada la evaluación por parte de los pares académicos, los autores recibirán el respectivo concepto, el cual puede ser aceptado, aceptado con modificaciones menores, aceptado con modificaciones mayores o no aceptado. En aquellos casos en que el manuscrito sea aceptado con modificaciones, el autor recibirá también las sugerencias y comentarios realizados por los evaluadores. Los manuscritos que no se ajusten a la temática de la revista y aquellos que no sigan en su totalidad las instrucciones para los autores serán devueltos sin pasar por el proceso de evaluación.

Los autores contarán con máximo un mes de plazo, a partir del envío de las evaluaciones, para hacer los ajustes del caso y enviar de nuevo la versión corregida del manuscrito al editor de la revista, acompañada de una carta explicativa en donde se detallan los ajustes incorporados. El Comité Editorial verificará la incorporación de los cambios al manuscrito y si lo considera pertinente la enviará de nuevo al par evaluador para su concepto. La decisión final sobre la publicación del manuscrito estará sujeta a la conformidad del par académico y

del Comité Editorial respecto a la inclusión de las modificaciones solicitadas al autor. Cuando el manuscrito es aceptado para publicación, los autores deberán firmar una declaración de originalidad y una autorización de los derechos de publicación y reproducción del manuscrito y de la inclusión en bases de datos, páginas web o páginas electrónicas, nacionales o internacionales. Cada autor recibirá tres (3) ejemplares del volumen en el cual se publica su artículo.

### Tipos de artículo

Las contribuciones de los colaboradores de la revista *Colombia Forestal* podrán corresponder a uno de los siguientes tipos de artículos:

**Artículo de investigación:** manuscrito que presenta de manera detallada los resultados originales de proyectos de investigación, siguiendo la metodología científica, los cuales representan aportes importantes a las ciencias forestales y del medio ambiente.

**Artículo de revisión:** manuscrito resultado de una investigación en el cual se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas, proporcionando información relacionada con los avances y las tendencias de desarrollo científico y tecnológico. Los artículos deben presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias, provenientes de artículos científicos en un 70%, como mínimo. Los artículos de revisión preferiblemente serán solicitados por el editor general de la revista a un especialista del tema.

La revista también podrá incluir una sección de Notas y Comentarios, con notas de interés técnico sobre conferencias, seminarios, foros, programas de investigación, extensión, educación y comentarios sobre nuevos libros o revistas.

## Instrucciones para preparación de manuscritos

El manuscrito, escrito en español o en inglés, no debe exceder de 30 páginas tamaño carta, escritas a doble espacio incluyendo texto, tablas, figuras y anexos. El texto debe escribirse en letra Times New Roman, tamaño 11, alineado a la izquierda o sin justificar.

En la primera página del manuscrito se debe indicar el título del artículo, los nombres completos del autor o autores y en nota al pie de página, el nombre de la institución de afiliación del autor, dirección postal y correo electrónico (preferiblemente institucional). En el pie de página también se debe indicar el autor encargado de la correspondencia.

Luego del encabezamiento del artículo con los respectivos **títulos** en **español e inglés** (o inglés y español cuando se trate de un manuscrito en inglés), debe ir un **título corto**, un **resumen** en español y un **abstract** en inglés, de no más de 150 palabras para cada uno. También se deben incluir mínimo tres y máximo diez **palabras clave** y **keywords**, en lo posible diferentes a las mostradas en el título y que reflejen el contenido del manuscrito y sean apropiadas para motores de búsqueda. Las palabras clave deben ir ordenadas alfabéticamente y las **keywords** deben corresponder en orden a la traducción de las palabras clave. Se recomienda usar tesauros de ciencias naturales en agricultura, biología, forestería y medio ambiente.

El contenido principal de los manuscritos de un artículo de investigación debe incluir las siguientes secciones en forma secuencial: **Introducción, materiales y métodos** (incluye área de estudio), **resultados, discusión, conclusiones, agradecimientos y referencias bibliográficas**. En los manuscritos de revisión no se requiere especificar las secciones de objetivos, materiales y métodos y resultados.

**Título:** presenta de manera concisa el tema tratado en la investigación, no debe exceder 15 palabras y se debe evitar el uso de puntos seguidos y guiones. En caso de presentar un subtítulo, este

debe ser separado del título principal por medio de dos puntos seguidos (:). El primer título debe corresponder al idioma original de la publicación y debe escribirse en letra mayúscula. El segundo título debe ser escrito en letra minúscula. Los nombres científicos utilizados en los títulos se deben escribir en letra minúscula itálica, para los dos títulos, además deben incluir el autor del nombre científico, escrito en letra minúscula normal (por ejemplo: *Podocarpus oleifolius* D. Don ex Lamb.)

**Resumen:** este aparte debe representar una síntesis del trabajo. Es necesario que incluya una breve alusión al objetivo de la investigación, la metodología utilizada, los resultados y la importancia de los hallazgos, en ese mismo orden. Los puntos clave de cada una de las secciones del artículo deben verse reflejados en el resumen. No se deben utilizar abreviaturas ni citas.

**Introducción:** este texto debe estar limitado al objeto de estudio, la definición del problema, la justificación del estudio y sus objetivos. Puede presentarse un breve marco teórico, siempre y cuando esté directamente relacionado con el problema de investigación.

**Materiales y métodos:** en esta sección se deberá incluir información asociada con el área donde se desarrolla la investigación (localización, información climática, entre otros). Además, debe incluir las técnicas y materiales de trabajo para la captura de información y el procesamiento y análisis de datos, incluyendo los recursos de *software* utilizados.

**Resultados:** esta sección debe presentar los resultados obtenidos, con base única y exclusivamente en la metodología planteada. Las tablas y figuras asociadas deben ser coherentes a lo escrito y responder a los objetivos de la investigación.

**Discusión:** en esta sección se confrontan y argumentan los resultados del estudio realizado con los resultados reportados por otros investigadores en la literatura académica que abarquen la temática de análisis.

**Conclusiones:** esta sección debe presentar los principales hallazgos encontrados por la

investigación, así como las implicaciones de la publicación en la temática específica de estudio.

**Agradecimientos:** debe presentar de manera sucinta las principales instituciones financiadoras del proyecto, entes cooperantes y demás actores que incidieron en el desarrollo de la investigación y elaboración del artículo.

**Referencias bibliográficas:** El formato de *Colombia Forestal* se basa en las normas APA (6<sup>ta</sup> edición), con modificaciones tanto para la creación como para la estandarización de citas y referencias bibliográficas en los manuscritos. Las citas en el texto se ordenan cronológicamente cuando se trata de más de una fuente y deben corresponder en su totalidad a las referencias en la sección de referencias bibliográficas. La separación entre el autor y el año se debe realizar mediante el uso de coma (,) y la separación entre citas se debe hacer con un punto y coma (;).

#### Ejemplos:

- Según Castro (1945) y González y Ruiz (1996),
- ... (Castro, 1945, 1975; González y Ruiz, 1996; Ramírez *et al.*, 2009).

Se debe usar *et al.*, para citar publicaciones de más de dos autores y a, b, c, d, etc., para distinguir entre varios trabajos del mismo autor y año.

#### Ejemplos:

- Como mencionan Parrado-Rosselli *et al.* (2007, 2007a, 2007b).
- ... (Parrado-Rosselli *et al.*, 2007, 2007a; López y Ferreira, 2008, 2008a).

Las referencias en la sección de referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente según el apellido del primer autor y cronológicamente para cada autor, o cada combinación de autores. En esta sección se deben escribir los nombres de todos los autores, sin usar *et al.* Los nombres de las publicaciones seriadas deben escribirse completos, no abreviados. Siga el siguiente formato:

**1. Artículos de revistas.** Apellido del autor, inicial(es) del nombre. Año entre paréntesis. Título del artículo. Nombre completo (no abreviado) de la revista, volumen y número (entre paréntesis), rango de páginas. Cuando se trate de dos o más autores, luego del apellido e inicial(es) del nombre del primer autor, seguido por una coma se coloca el apellido del segundo autor y la(s) inicial(es) del(os) nombre(s), y así sucesivamente, separándolos con comas.

#### Ejemplos:

- Páez, F.E.** (1983). Un nuevo registro de planta para Colombia. *Lozania*, 5, 32- 46.
- Mendoza, H. y Ramírez, B.** (2001). Dicotiledóneas de La Planada, Colombia: Lista de especies. *Biota Colombiana*, 2, 123-126.
- Dey, D., Royo, A., Brose, P., Hutchinson, T., Spe-tich, M. y Scott, S.** (2010). An ecologically based approach to oak silviculture: a synthesis of 50 years of oak ecosystem research in North America. *Colombia Forestal*, 13(2), 201-222.

**2. Libros.** Apellido del autor, inicial(es) del(os) nombre(s). Año entre paréntesis. Título del libro. Ciudad: Nombre de la Editorial. Número de páginas. Si se trata de un libro colegiado, pero no un capítulo específico, como autor se utiliza el nombre del editor o editores seguido de (ed.) o (eds.). Cuando se trate de dos o más autores, luego del apellido e inicial del nombre del primer autor, seguido por una coma se coloca el apellido del segundo autor y la(s) inicial(es) del(os) nombre(s), y así sucesivamente, separándolos con comas.

#### Ejemplos:

- Krebs, J.** (1978). *Ecological methodology*. New York: Harpers y Row, Publisher. 166 p.
- Mahecha, G., Rosales, H., Ruiz, G. y Mota, P.** (2008). *Las propiedades mecánicas de la madera de tres especies forestales*. Bogotá: Editorial Manrique. 134 p.

**3. Capítulo dentro de un libro.** Apellido del autor del capítulo, inicial(es) del(os) nombre(s). Año entre paréntesis. Título del capítulo. En inicial(es)

del(os) nombre(s) del editor y apellido (ed. o eds.). Nombre del Libro (pp. seguido del rango de páginas). Ciudad: Nombre de la Editorial. Cuando se trate de dos o más autores: luego del apellido e inicial del nombre del primer autor, seguido por una coma se coloca el apellido del segundo autor y la(s) inicial(es) del(os) nombre(s), y así sucesivamente, separándolos con comas.

#### Ejemplos:

**Suárez, R.L.** (1985). La familia Melastomataceae. En M.R. Téllez y L.J. Torres (eds.). Los arboles de la Costa Atlántica (pp. 187-195). Lima: Editorial Pulido.

**Prentice, I.C.** (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. En J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguier, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell y C.A. Johnson (eds.). Climate Change 2001: The Scientific Basis (pp. 135-237). United Kingdom-New York: Cambridge University Press.

**4. Documentos de grado.** Se debe evitar el uso trabajos y tesis de grado. Se recomienda, utilizar y referenciar las publicaciones en revistas arbitradas derivadas de dicho trabajo. De ser estrictamente necesario, estos documentos se deben citar de la siguiente manera: Apellido del autor, inicial(es) del(os) nombre(s). Año entre paréntesis. Título del documento de grado (por ejemplo tesis doctoral, trabajado de pregrado), seguido del programa de graduación (por ejemplo Ingeniería Forestal, M.Sc., Ph.D). Ciudad: Nombre de la institución que publica o afiliación institucional del documento. Número de páginas. Cuando se trate de dos o más autores, luego del apellido e inicial del nombre del primer autor, seguido por una coma se coloca el apellido del segundo autor y la(s) inicial(es) del(os) nombre(s), y así sucesivamente, separándolos con comas.

#### Ejemplo:

**González-M., R.** (2010). Cambios en la distribución espacial y abundancia de la palma Bombona (*Iriartea deltoidea* Ruiz & Pav., Arecaceae) en

diferentes grados de intervención antropogénica de los bosques de tierra firme del Parque Nacional Natural Amacayacú, Amazonas-Colombia (Trabajo de pregrado, Ingeniería Forestal). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 90 p.

**Pitman, N.** (2000). A large-scale inventory of two Amazonian tree communities (Ph.D. thesis) Durham: Duke University, Department of Botany. 220 p.

**5. Software.** Autor(es). Año entre paréntesis. Nombre del *software*. Ciudad: Nombre de la institución u organización que desarrolla el *software*. ISBN, Dirección URL de contacto.

**R Development Core Team.** (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0, Recuperado de <http://www.R-project.org>.

#### Figuras y tablas

Las figuras (fotos, mapas, ilustraciones y gráficas) deben incluir en la parte inferior la respectiva leyenda numerada en orden secuencial que explique detalladamente el contenido (usar letra tamaño Times New Roman, 10 puntos). Las figuras deben incluir el título de los ejes (con inicial mayúscula) centrado y las unidades de medida. La letra de todas las graficas debe ser Times New Roman, en un tamaño apropiado para impresión. Si en cada figura hay más de un panel, utilice letras minúsculas (a, b, c) para designar cada uno. Utilice color en las figuras, recuerde que la publicación será online. Envíe las figuras en formato jpg o .tif con una resolución mínima de 300 dpi y un ancho mínimo de 1200 pixeles.

Las tablas deben estar acompañadas de la leyenda en la parte superior que explique detalladamente el contenido (usar letra tamaño 10), sin líneas verticales y solo tres líneas horizontales. Las tablas y figura (máximo 5 de cada una) deben estar

citadas en el texto y si el manuscrito es aceptado para publicación, deben enviarse en archivo aparte, una por cada hoja, primero todas las tablas y luego todas las figuras.

En los casos excepcionales en los que se incorporen figuras o tablas, tomadas de otra publicación, se debe tener autorización por escrito del(os) propietarios de los derechos de copia y reproducción, así como citar la fuente. La *Revista Colombia Forestal* entenderá que todas las figuras y tablas son originales y responsabilidad de los autores, salvo en los casos que se envíe la notificación escrita en la que se certifique lo contrario. Figuras y tablas con cita fuente serán eliminadas en el caso que los autores no envíen esta certificación.

## Nomenclatura, abreviaturas, siglas y unidades

**Nombres científicos:** el nombre completo en latín (género y epíteto) debe mencionarse completamente para cada organismo la primera vez que se aluda en el texto, desde la sección de introducción, (por ejemplo: *Protium heptaphyllum* (Aubl.) March.), posteriormente deberá mencionarse tan solo la letra inicial en mayúscula del género y el epíteto completo (ejemplo: *P. heptaphyllum*). Se debe corroborar la correcta escritura de los nombres en latín, así como los autores; para esto se recomienda utilizar las bases especializadas como W3-Trópicos (<http://mobot.mobot.org/>), The International Plant Names Index (<http://www.ipni.org/>), The Plant List (<http://www.theplantlist.org/>).

**Abreviaturas:** se debe usar letra cursiva en abreviaturas como e.g. *i.e. et al.* No utilice cursiva en los términos sp., cf. y aff., ni en los nombres de los autores. Las siglas y acrónimos se deben describir la primera vez que se mencionen en el texto (ejemplo: Organización de las Naciones Unidas -ONU); posteriormente, solo se debe usar la sigla o el acrónimo.

**Unidades de medida:** las unidades utilizadas deben seguir los siguientes parámetros: Sistema Internacional de Unidades: ha, km, m, cm, mm, h, min, s, kg, g. Las cifras decimales deben separarse

por un punto (ejemplo: 0.5, no 0,5), las cifras de los miles se agrupan de a tres, comenzando por la derecha, con un espacio entre cada grupo, en números de cinco o más cifras (15 000). Los números de cuatro cifras se escriben todos juntos (1500, no 1 500). Para porcentajes y grados utilice símbolos (ejemplo: 15 %, no 15 por ciento).

**Posición geográfica:** escriba siempre en minúscula los puntos cardinales (norte, sur, este y oeste), exceptuando cuando se usen las abreviaturas (N, S, E, W). Las coordenadas geográficas se deben conformar de la siguiente manera: grados (°); minutos ('); segundos ("); latitud (norte, sur o N, S)–grados (°), minutos ('), segundos ("); longitud (este, oeste o E, W). Ejemplo: 04°12'11.5" latitud norte–78°24'12" longitud oeste). La altitud geográfica se debe expresar en m de altitud y no en m.s.n.m. o msnm.

## Envío

El(los) autor(es) debe(n) cargar los archivos directamente en el aplicativo: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/about/submissions#onlineSubmissions>, para lo cual previamente deben crear un usuario como autor y seguir las instrucciones del aplicativo. El archivo de texto debe estar en formato Word y no superar 3 mb; asimismo, se debe numerar consecutivamente todas las líneas del manuscrito. Las figuras y tablas deben estar incorporadas al final del manuscrito. Los archivos originales de cada figura y tablas en alta resolución solo se requerirán cuando el manuscrito haya sido aceptado para publicación; en este caso, una vez sean solicitados se deben subir en el aplicativo como ficheros adicionales.

## Información adicional

Para información adicional o consulta sobre las instrucciones a los autores, visite la dirección <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/index> o escribanos a la siguiente dirección de correo electrónico [colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co).



---

## GUIDELINES FOR AUTHORS

**Colombia Forestal** publishes original contributions in forestry, renewable natural resources and the environment, with special emphasis on the Republic of Colombia. The journal is aimed both nationally and internationally at professionals involved in the management of renewable resources.

### Selection and evaluation of manuscripts

The process of manuscript evaluation involves short listing and general revision by an Editorial Committee followed by evaluation by specialist peers. Peer reviewers will assign a status for each manuscript: approved, approved with some minor modifications, approved with major modifications or not approved. In cases in which a manuscript is approved with some modifications the author will receive the suggestions and comments made by the reviewers.

The authors will be given a maximum of one month to make the corrections required including the day in which the manuscripts are returned with the reviewers comments. The revised manuscript must then be sent to the editor of the journal with a letter explaining the adjustments made. The Editorial Committee will verify incorporation of the changes to the manuscript and if they consider it necessary it will be returned to the peer reviewer for further evaluation.

The final decision on publication of the manuscript will be made by the peer reviewer and the Editorial Committee. If the document is approved for publication the authors will be required to sign a declaration of originality and an authorization of the rights of publication and reproduction of their manuscript, as well as the inclusion of it in databases, web sites or any electronic pages, national or international. Each author will receive three copies of the volume in which their article is published.

### Types of article

Colombia Forestal accepts the following types of article:

**Research Article:** This is a manuscript that presents in a detailed way the results of original research projects, following scientific methodology that also represents an important contribution to forest science or to the area of renewable natural resources.

**Revision Article:** This is a manuscript based on the results of published or unpublished studies that have been integrated to provide information related to a particular theme. The articles must include a careful bibliographic revision of at least 50 references. Revision articles will preferably have been solicited by the general editor of the journal to a specialist in the topic.

The journal also includes a Notes and Comments section, which can include notes of technical interest about conferences, fora, research, communication or education programs, as well as reviews of new books or journals.

### Preparation instructions

The manuscript must not exceed 30 (thirty) pages letter sized, double spaced including the text, tables, diagrams and appendices. The text must be written in Times New Roman font, size 11 and aligned to the left.

The first page of the manuscript must indicate the title of the article, the full name of the author or authors with a footnote indicating author affiliation, postal address and email. In the footnote the author for correspondence must be indicated.

After the heading of the article with the titles in Spanish and English, a short running head title must be written, followed by an abstract in Spanish and one in English each of which can be up to 150

words. A minimum of three and a maximum of ten key words must be included, preferably different from those used in the title but that also reflect the content of the article and that may be appropriate for search engines.

The main content of all the manuscripts except revision articles must have the following sections arranged in the sequence indicated: **Introduction**, **Materials and Methods**, **Results**, **Discussion**, **Conclusions**, **Acknowledgements** and **Bibliographic References**. In addition to the appendices, tables and diagrams must be included. In revision articles it is not necessary to specify the objectives, materials and methods or results sections.

**Title:** this should concisely state the subject of the study and should not exceed 15 words. Avoid the use of colons and hyphens but if a sub-title is necessary this should be separated from the main title by a colon. The main title should be written in uppercase and the sub-title in lower-case. Scientific names should be written in lower-case italics and should include the author written in normal lowercase (for example *Podocarpus oleifolius* D. Don ex Lamb.).

**Abstract:** the summary must be a short synthesis of the text. This includes a brief mention of the objectives of the research, the methodology, the results and the importance of the findings in that order. The key points of each section must be reflected in the summary. Abbreviations and quotes should not be used.

**Introduction:** this should be limited to the objectives of the study, definition of the problem and justification for the study. A brief theoretical framework can be given only if it is directly related to the research problem.

**Materials and Methods:** include information on the geographical area of the study (locality, climatic data etc.). Also include information on the techniques utilized, the study material and the method of analysis, including which software resources were used.

**Results:** present the results on the basis of the methodology indicated in the previous section. Tables and associated figures should directly respond to the objectives of the investigation.

**Discussion:** interpret the results of the study and compare with results reported in previously published relevant literature.

**Conclusions:** present the main findings of the project and the implications for the study area.

**Acknowledgements:** state the institutes that provided finance for the project along with the individuals that helped with the development of the study and the production of the paper.

**Bibliographic References:** follow the format laid out in the 6th edition of the APA with some modifications. References in the text must be organized chronologically and must directly correspond to those cited in the section Bibliographic References.

#### Examples:

- According to Castro (1945) and González and Ruiz (1996),
- (Castro, 1945; González and Ruiz, 1996; Ramírez *et al.*, 2009).

The letters a, b, c, d, etc. must be used to distinguish different articles by the same author in the same year.

- As mentioned by Parrado-Rosselli *et al.* (2007, 2007a, 2007b).
- Parrado-Rosselli *et al.* (2007, 2007a; López and Ferreira, 2008, 2008a).

References must be ordered alphabetically according to the last name of the first author and chronologically for each author or combination of authors.

The names of all the authors must be written. The names of journals must not be abbreviated. Use the following format:

**1. Journal Articles:** Last name of the author, initial(s) of the name. Year. Title of the Article. Full name of the journal, volume and number (in brackets): range of pages. When there are two or more authors, the last name and initial of the name of the first author, must be followed by a comma, and then by the initial(s) with period of the name of the

second author followed by the last name and so on, using commas to separate them.

*Examples:*

**Páez, F.E.** (1983). Un nuevo registro de planta para Colombia. *Lozania*, 5, 32- 46.

**Mendoza, H. and Ramírez, B.** (2001). Dicotiledóneas de La Planada, Colombia: Lista de especies. *Biota Colombiana*, 2, 123-126.

**Dey, D., Royo, A., Brose, P., Hutchinson, T., Spetich, M. and Scott, S.** (2010). An ecologically based approach to oak silviculture: a synthesis of 50 years of oak ecosystem research in North America. *Colombia Forestal*, 13(2), 201-222.

**2. Books.** Last name of the author, author initial(s). Year. Title of the book. Name of the editorial house. City. Number of pages. If it is a collegiate book but not a specific chapter, the name of the editor(s) is used as the name of the author followed by (ed.) or (eds.). When there are two or more authors the last name and initial of the name of the first author, should be followed by a comma followed by the initial(s) with period of the name of the second author followed by the last name and so on, separating them with commas.

*Examples:*

**Krebs, J.** (1978). *Ecological methodology*. New York: Harpers and Row, Publisher. 166 p.

**Mahecha, G., Rosales, H., Ruiz, G. and Mota, P.** (2008). *Las propiedades mecánicas de la madera de tres especies forestales*. Bogotá: Editorial Manrique. 134 p.

**3. Chapter within a book.** Last name of the author of the chapter, initial(s) of the name(s). Year. Title of the chapter, number of pages. Last name of the editor and initial(s) of the name(s) (ed). Name of the book. Name of the editorial house, City. When there are two or more authors or editors the last name and initial of the name of the first author should be followed by a comma, the initial(s) with period of the name of the second

author, followed by the last name and so on, separating them with commas.

*Examples:*

**Suárez, R.L.** (1985). La familia Melastomataceae. En M.R. Téllez and L.J. Torres (eds.). *Los arboles de la Costa Atlántica* (pp. 187-195). Lima: Editorial Pulido.

**Prentice, I.C.** (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. En J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (eds.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (pp. 135-237). United Kingdom-New York: Cambridge University Press.

**4. Senior projects or unprecedented publications.** Last name of the author, initial(s) of the name(s). Year. Title of the Senior Project or unprecedented publication. Type of publication.

Name of the institution or company that publishes the document. City. Number of pages. When there are two or more authors, the last name and initial of the name of the first author should be followed by comma, followed by the initial(s) of the name of the second author with period, followed by the last name and so on, separating them with commas.

*Examples:*

**González-M., R.** (2010). *Cambios en la distribución espacial y abundancia de la palma Bombona (Iriartea deltoidea Ruiz & Pav., Arecaceae) en diferentes grados de intervención antropogénica de los bosques de tierra firme del Parque Nacional Natural Amacayacú, Amazonas-Colombia* (Trabajo de pregrado, Ingeniería Forestal). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 90 p.

**Pitman, N.** (2000). *A large-scale inventory of two Amazonian tree communities* (Ph.D. thesis) Durham: Duke University, Department of Botany. 220 p.

**5. Software.** Author(s). Year. Name of the software. Name of the institution or organization that developed the software. City. ISBN. URL address of contact.

**Example:**

**R Development Core Team.** (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0, recuperado de <http://www.R-project.org>

**Figures and tables**

Figures (photos, maps, illustrations and graphs) must include in the reverse side the correspondent label numbered in sequential order that also explains content detail (font size 10). Graphs must include the title of the axis centered (with the initial in capital letter) together with the units of measurement. The font of all the graphs must be Times New Roman, at an appropriate size for printing. If in each illustration there is more than one panel, lower case (a, b, c) must be used to designate each one. Use color in illustrations. Send the illustrations in the following formats: .jpg or .tif with a minimum resolution of 300 dpi and a minimum width of 1200 pixels.

Tables must be included with the legend explaining in detail the content (font size 10) placed above. The table should be without vertical lines and with only three horizontal lines. The tables and illustrations must be quoted in the text and must be sent in a different file, one on each sheet, first all the tables and then all the illustrations.

**Nomenclature, abbreviations, acronyms and units Scientific names:** the name in Latin (genus and specific epithet) must be written completely for each organism the first time it is mentioned in the text (e.g. *Protium heptaphyllum*) and thereafter the initial of the genus must be written with a capital letter followed by the complete specific epithet (e.g. *P. heptaphyllum*). Names in Latin and authors should be corroborated by referring to specialist databases such as W3-Trópicos (<http://mobot.mobot.org/>) or The International Plant Names Index (<http://www.ipni.org/>).

**Abbreviations:** The writing of scientific names of plants or animals (genus and species) must be

written in italics as should abbreviations e.g. i.e. et al. Do not use italics with the terms sp., cf. or aff., nor with the names of authors. Acronyms should be written in full the first time that they are mentioned in the text, for example, United Nations (UN), and thereafter use just the acronym or initials.

**Units of Measurement:** follow the International System of Units: ha, km, m, cm, mm, h, min, s, kg, g. Decimals should be separated by a point (e.g. 0.5 and not 0,5), while units of thousand should be separated by a space (e.g. 28 000 and not 28,000). For percentages and degrees utilize symbols rather than words (e.g. 15 %, not 15 percent).

**Geographic position:** write north, south, east and west in lower-case or use upper-case when using abbreviations (i.e., N, S, E and W). Geographical coordinates should be written as degrees (°), minutes (′) and seconds (″) latitude (north, south or N, S) followed by degrees (°), minutes (′) and seconds (″) longitude (east, west or E, W), (example: 04°12′11.5″ north–78°24′12″ west). Altitude should be stated in metres without using the abbreviation a.s.l.

**Instructions for submitting the document**

Manuscript may be uploaded using the following link: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/about/submissions#onlineSubmissions>. It will be necessary to create an author user id before continuing with the instructions. The file must be sent in Word format or something compatible. The figures and diagrams must be uploaded as separate files with their corresponding labels. The original document with the illustrations will be required only after the document has been accepted for its publication.

**Additional information**

For additional information or details regarding authors instructions visit <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/index> or write to the journal at [colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co)



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

### Gestión

PKP | PUBLIC KNOWLEDGE PROJECT Open Journal System

### Indexación

# Scopus



Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Sede Vivero – Avenida Circunvalar – Venado de Oro, Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: [colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co)

Portal web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor>

Colombia Forestal está bajo una licencia Creative Commons–4.0 Colombia License.



Atribución-Compartir Igual

CHANGES IN SOIL QUALITY ASSOCIATED WITH THE IMPLEMENTATION OF ECOLOGICAL AGRICULTURE TECHNIQUES IN COFFEE PLANTS UNDER DIFFERENT COVERINGS

**Cambios en calidad del suelo asociados a la aplicación de técnicas de agricultura ecológica en plantas café bajo diferentes coberturas**

Paula Daniela Gómez Pinzon, Leaddy Karolinna Ariza Vargas, Lizeth Manuela Avellaneda-Torres

USING INVERSE MODELING BY HYDRUS-1D TO PREDICT SOME SOIL HYDRAULIC PARAMETERS FROM SOIL WATER EVAPORATION

**Uso del modelado inverso por HYDRUS-1D para predecir algunos parámetros hidráulicos del suelo a partir de la evaporación del agua del suelo**

Esam Mohammed, Salahaldeen Abid-Alziz AL-Qassab, Faris Akram Salih AL-Wazan

EXPLORACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS BOSQUES PERIURBANOS EN MÉRIDA, VENEZUELA

**Exploration and comparison of spatial distribution of peri-urban forests in Mérida, Venezuela**

Deyriana del Valle Vásquez-Rivas, Jesús Enrique Andrades-Grassi, Luis E. Gámez y Gerardo Gabriel Rodríguez L.

VEGETACIÓN LEÑOSA DE UN REMANENTE DE BOSQUE SECO TROPICAL EN EL CARIBE COLOMBIANO

**Woody vegetation of a tropical dry forest remnant in the Colombian Caribbean**

Viviana Londoño-Lemos, Juan Tapasco-García, Orlando Escobar-Hadechini, Santiago Madrián

REGENERACIÓN DE YEMAS ADVENTICIAS EN SEGMENTOS DE HOJAS Y ENTRENUDOS DE *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.

**Regeneration of adventitious buds on leaf and internode segments of *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl.**

Evelyn Raquel Duarte

FUNCIÓN AHUSAMIENTO-VOLUMEN COMERCIAL DE *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. EN VARIAS REGIONES DE MÉXICO

**Commercial taper-volume function of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. in several regions of Mexico**

Juan Carlos Guzmán-Santiago, Benedicto Vargas-Larreta, Martín Gómez-Cárdenas, Gerónimo Quiñonez-Barraza

ISSN 0120-0739



9 770120 073000

