

Contenido

Artículos de Investigación Científica y Tecnológica

AGRUPACIÓN FUNCIONAL DE ESPECIES VEGETALES PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE ECOSISTEMAS DE MONTAÑA, BOGOTÁ, COLOMBIA Functional grouping of plant species for the ecological restoration of mountain ecosystems, Bogotá, Colombia Maribel Vásquez-Valderrama & Jairo Solorza-Bejarano	5
RIQUEZA FLORÍSTICA Y RECAMBIO DE ESPECIES EN LA VERTIENTE ORINOQUENSE DE LOS ANDES, COLOMBIA Floristic richness and species turnover in the Orinoco slope of the Andes cordillera Colombia William Trujillo-C. & María Mónica Henao-Cárdenas	18
ECUACIONES DE VOLUMEN TOTAL Y DE RAZÓN PARA ESTIMAR EL VOLUMEN COMERCIAL DE <i>Swietenia macrophylla</i> King Total volume and ratio equations to estimate the commercial volume of <i>Swietenia macrophylla</i> King Jonathan Hernández-Ramos, Adrián Hernández-Ramos, Xavier García-Cuevas , Juan Carlos Tamarit-Urias, Luis Martínez-Ángel & Jesús García-Magaña	34
IMPACTO DE <i>Alnus acuminata</i> Kunth EN LOS FLUJOS DE N ₂ O Y CALIDAD DEL PASTO <i>Pennisetum clandestinum</i> Hochst. ex Chiov. <i>Alnus acuminata</i> Kunth impact on N₂O fluxes and quality of <i>Pennisetum clandestinum</i> Hochst. ex Chiov. grass Amanda Silva-Parra, Seydyss Garay-Rodríguez & Arturo S. Gómez-Insuasti	47
CRECIMIENTO PLANTULAR EN CONDICIONES DE INVERNADERO DE LA ESPECIE FORESTAL <i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwith Seedling growth in greenhouse conditions of the forest species <i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwith Georgina Vargas-Simón, Reinaldo Pire & Martha Lázaro Dzul	58
EXPANSIÓN LINEAL Y PUNTO DE SATURACIÓN DE LAS FIBRAS DE LA <i>Guadua angustifolia</i> Kunth Linear expansion and fiber saturation point of <i>Guadua angustifolia</i> Kunth Mateo Gutiérrez González , Jessika Isabel Bonilla Santos, María Fernanda Cruz Amado & Juan Guillermo Quintero Aranzalez	69

EFECTO BIOESTIMULANTE DE <i>Trichoderma harzianum</i> Rifai EN POSTURAS DE LEUCAENA, CEDRO Y SAMÁN Biostimulating effect of <i>Trichoderma harzianum</i> Rifai on seedling of Leucaena, Cedar and Saman Tarsicio Santana Díaz [†] & Leónides Castellanos González	81
EFECTO DE INCLUSIÓN DE ANTICOAGULANTES DURANTE EL BENEFICIO DE <i>Hevea brasiliensis</i> (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. Effect of inclusion of anticoagulants during the benefit of <i>Hevea brasiliensis</i> (Willd. ex A.Juss.) Müll. Arg. Lina Paola Mendoza-Vargas & Javier Alexander Jiménez-Forero	91
INTERPOLACION REGNIE PARA LLUVIA Y TEMPERATURA EN LAS REGIONES ANDINA, CARIBE Y PACÍFICA DE COLOMBIA Regnie interpolation for rain and temperature in the andean, caribbean and pacific regions of Colombia Diego Fernando Alzate Velásquez, Gustavo Alfonso Araujo Carrillo, Edwin Oswaldo Rojas Barbosa, Douglas Andrés Gómez Latorre & Fabio Ernesto Martínez Maldonado	102
DECLARACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS EDITORIALES Y NORMAS ÉTICAS DE COLOMBIA FORESTAL	119
INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES	122

ARTÍCULOS
DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

AGRUPACIÓN FUNCIONAL DE ESPECIES VEGETALES PARA LA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE ECOSISTEMAS DE MONTAÑA, BOGOTÁ, COLOMBIA

Functional grouping of plant species for the ecological restoration of mountain ecosystems, Bogotá, Colombia

Maribel Vásquez-Valderrama¹ & Jairo Solorza-Bejarano²

Vásquez-Valderrama, M., & Solorza-Bejarano, J. (2018). Agrupación funcional de especies vegetales para la restauración ecológica de ecosistemas de montaña, Bogotá, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(1), 5-17

Recepción: 3 de abril de 2017

Aprobación: 28 de agosto de 2017

Resumen

Los ecosistemas de montaña están sometidos a diversos factores de perturbación que requieren el desarrollo de procesos de restauración ecológica, orientados a su recuperación estructural y funcional. En este estudio se analizaron los atributos funcionales de las especies vegetales de ocho especies vegetales incorporadas en áreas piloto de investigación en restauración ecológica presentes en Bogotá. Se registró el área foliar (AF), área foliar específica (AFE), contenido foliar de materia seca (CFMS), densidad de madera (dB), altura máxima (Hmax) y hábito de crecimiento de *Ageratina aristei*, *Abatia parviflora*, *Baccharis latifolia*, *Myrcianthes leucoxylla*, *Solanum oblongifolium*, *Vallea stipularis*, *Viburnum triphyllum* y *Xylosma spiculifera*. Se encontraron tres grupos funcionales, los cuales presentan características de especies exclusivamente adquisitivas o adquisitiva-conservativa, lo que sugiere diferentes mecanismo y estrategias y mecanismos de adaptación a las condiciones de recuperación de las áreas perturbadas.

Palabras clave: altura máxima, área foliar específica, atributo funcional, contenido foliar, densidad de madera.

Abstract

Mountain ecosystems are subject to various factors of disturbance, therefore different ecological restoration processes should be developed for achieving their structural and functional recovery. In this study, we analyzed the functional attributes of eight plant species used in ecological restoration research areas in Bogotá. Leaf area (AF), leaf area of dry matter (CFMS), wood density (dB), maximum height (Hmax) and growth habit of *Ageratina aristei*, *Abatia parviflora*, *Baccharis latifolia*, *Myrcianthes leucoxylla*, *Solanum oblongifolium*, *Vallea stipularis*, *Viburnum triphyllum* and *Xylosma spiculifera* were quantified. Three plant functional groups were found with exclusive characteristics of acquisitive or acquisitive-conservative species, suggesting different mechanisms and strategies of adaptation for the recovery of disturbed areas.

Key words: maximum height, functional attribute, specific foliar area, leaf content, wood density.

1 Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Bogotá, Colombia. mvasquez@jbb.gov.co Autor para correspondencia.

2 Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Bogotá, Colombia. jsolorza@jbb.gov.co

DOI: <http://doi.org/10.14483/2256201X.11730>

INTRODUCCIÓN

La biodiversidad hace referencia a elementos de la naturaleza que pueden ser descritos, clasificados, medidos y que están relacionados con procesos y funciones de los ecosistemas (Mayer, 2006). Representa un reto determinar la dinámica de la biodiversidad, los procesos del ecosistema y los factores abióticos (Loreau *et al.*, 2001). La diversidad funcional combina diferentes tipos de procesos importantes en la estructura y estabilidad dinámica de una comunidad (Moore, 2001). Los efectos en el funcionamiento de los ecosistemas, relacionados con la abundancia, la composición, la distribución y las características de las especies, se pueden representar a través de atributos funcionales (Martín-López *et al.*, 2007), compuestos de rasgos morfológicos y fisiológicos de los individuos y expresados en el crecimiento, la reproducción y la supervivencia (Violle *et al.*, 2007; Duffy *et al.*, 2007). Los atributos funcionales son, entonces, un indicador funcional de los ecosistemas dadas las características esenciales de las especies que permiten el equilibrio entre la adquisición y procesamiento de recursos (Leps *et al.*, 2006).

Los rasgos más comunes en estudios sobre grupos funcionales corresponden a atributos de las hojas como el área foliar, el área foliar específica y el contenido foliar de materia seca (Wright *et al.*, 2004). En la actualidad, se han incluido otros rasgos como la densidad de madera, la cual tiene una estrecha relación con la supervivencia y crecimiento de las plantas (Chave *et al.*, 2009). Algunos rasgos hidráulicos del tallo como densidad y diámetro de vasos tienen implicaciones en la regulación hídrica de los individuos vegetales (Reich, 2014), ayudando a comprender con más detalle las relaciones de compromisos de las plantas (Díaz *et al.*, 2016).

Es común encontrar agrupaciones de las especies presentes en los ecosistemas a partir de grupos funcionales, los cuales se pueden interpretar como un conjunto de especies que cumplen un rol funcional en un espacio definido (Hawkins *et al.*,

1989). De esta forma, el análisis de estos atributos se pueden considerar una herramienta efectiva para analizar la diversidad de respuestas eco-fisiológicas en los ecosistemas naturales (Chapin, 1993; Squeo *et al.*, 1999) y en los procesos de restauración ecológica, este último, centrado en mejorar las relaciones de biodiversidad y los servicios de los ecosistemas (Benayas *et al.*, 2009).

En los procesos de restauración ecológica, los atributos de los grupos funcionales se emplean como indicadores del funcionamiento del ecosistema y de los cambios generados por perturbaciones (Wortley *et al.*, 2013; Murcia & Guariguata, 2014; Ostertag *et al.*, 2015), así como facilitadores y orientadores para la selección de especies (Barrera-Cataño & Valdés-López, 2007; Castellanos-Castro & Bonilla, 2011). El objetivo de este estudio fue caracterizar los atributos funcionales de las especies que con mayor frecuencia y abundancia se emplean en los procesos de restauración ecológica desarrollados por el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y sus implicaciones en la recuperación de ecosistemas de alta montaña.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El Jardín Botánico de Bogotá cuenta con ocho áreas piloto de investigación en restauración ecológica (Apire) en del distrito capital y desde el año 2012 ha adelantado procesos en escenarios con diferentes factores de perturbación (v.g. cultivos agrícolas, ganadería, invasiones biológicas, plantaciones forestales exóticas e incendios). Las Apire (figura 1) se encuentran distribuidas en las localidades de Santa Fe (Parque Nacional Enrique Olaya Herrera y Venado de Oro), Suba (Las Mercedes), Engativá (La Florida), San Cristóbal (La Arboleda), Usme (Cantarrana y Arrayanes-Curubital) y Ciudad Bolívar (Mochuelo-Pasquilla-Mercedes) (Solórzua, 2016). Corresponden a ecosistemas zonales

de bosque andino y altoandino, entre los 2550 y 3200 m de altitud, con un comportamiento climático bimodal, de precipitación promedio anual de 1000 mm, temperatura media anual entre los 12 y 15°C, valores máximos de 25°C y mínimos por debajo de los 0°C (Barrera-Cataño *et al.*, 2010).

Registro y medición de rasgos funcionales

En el periodo entre los años 2012 y 2015, el Jardín Botánico de Bogotá ha desarrollado la incorporación de 119 689 individuos vegetales, correspondientes a 113 especies y 49 familias, con el objetivo de recuperar áreas con diferentes factores de perturbación. Las especies de estudio fueron seleccionadas de acuerdo con la frecuencia relativa de uso en al menos siete de las ocho Apire, donde el registro de muestras se realizó con individuos juveniles de las especies seleccionadas.

A las especies seleccionadas se les registró atributos funcionales de fácil medición (Casanoves *et al.*, 2011). Se trabajó con seis atributos en total, tres foliares, uno de tallo y dos de historia de vida. Para los rasgos foliares se seleccionaron cinco individuos por especie y cinco hojas por individuo, a los que se les midió el área foliar específica (AFE), el área foliar (AF) y el contenido foliar de materia seca (CFMS) mediante el empleo del software libre ImageJ (Schneider, 2012), y determinados a partir de los protocolos sugeridos por Corneliessen *et al.* (2003) y Salgado-Negret (2015).

Los rasgos de tallo y de historia de vida tales como densidad de madera (dB), altura máxima (Hmax) y hábito de crecimiento, se tomaron de registros publicados para las especies. En los casos en los que no se encontró información específica de la especie se trabajó con información del género. Se utilizó el sistema APG III para la clasificación

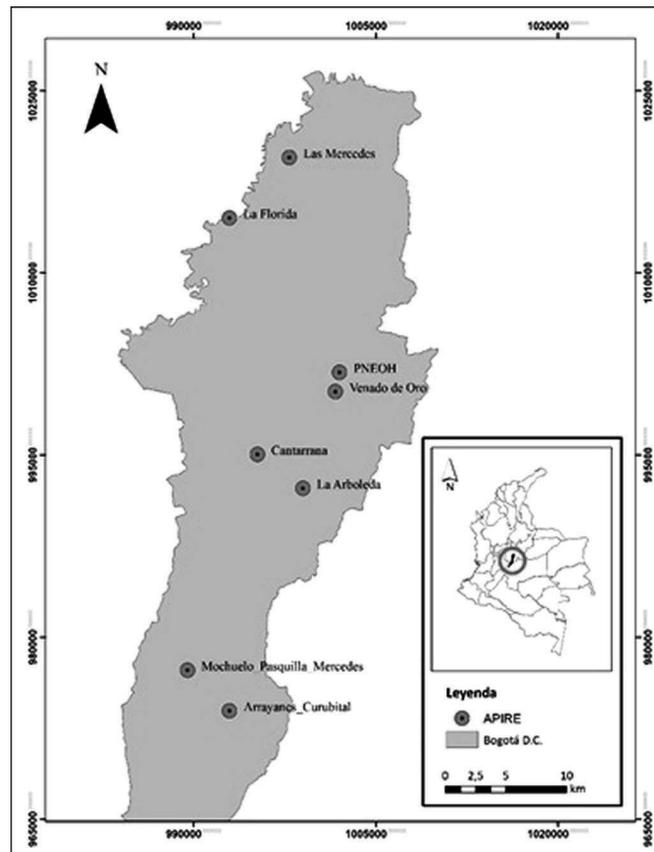


Figura 1. Áreas piloto de investigación en restauración ecológica en Bogotá, Colombia.

de especies (The Angiosperm Phylogeny Group, 2009), donde el clúster indica las relaciones de parentesco filogenético de las especies en estudio, construido a partir de las entidades taxonómicas de las especies y del árbol filogenético dispuesto por el software Phylocom (Webb et al., 2008).

Análisis de datos

Se realizaron análisis de varianza para determinar diferencias de los rasgos funcionales entre las especies y dentro de la especie. Cuando no se cumplieron los supuestos estadísticos se realizaron transformaciones log₁₀ para el análisis. Se emplearon pruebas postHoc para determinar diferencias entre pares de especies (mínima diferencia significativa de Fisher-LSD), y prueba Honesta de Tukey HDS. Se construyeron análisis de componentes principales (ACP) para identificar agrupaciones de las especies respecto a sus atributos funcionales. Finalmente, se realizaron clúster de

las especies de acuerdo con sus abundancias y presencia en las áreas, identificando relaciones de parentesco (filogenético) y grupos funcionales. Todos los análisis se corrieron en el software estadístico R Project© (R Core Team, 2016).

RESULTADOS

De las 11 especies que representan el 28.4 % de los individuos sembrados en al menos siete Apire, entre el año 2012 y 2015, se seleccionaron ocho para caracterizar sus rasgos funcionales: *A. aristei* (2120 ind), *A. parviflora* (1763 ind), *B. latifolia* (2740 ind), *M. leucoxylla* (2838 ind), *S.oblongifolium* (11 073 ind), *V. stipularis* (2134 ind), *V. triphyllum* (3456 ind) y *X. spiculifera* (2565 ind), excluyendo a *Smallanthus pyramidalis* (2 672 ind), *Verbesina crassiramea* (1858) y *Clusia multiflora* (807 ind), ya que no se contó con individuos juveniles para el registro de información (figura 2).

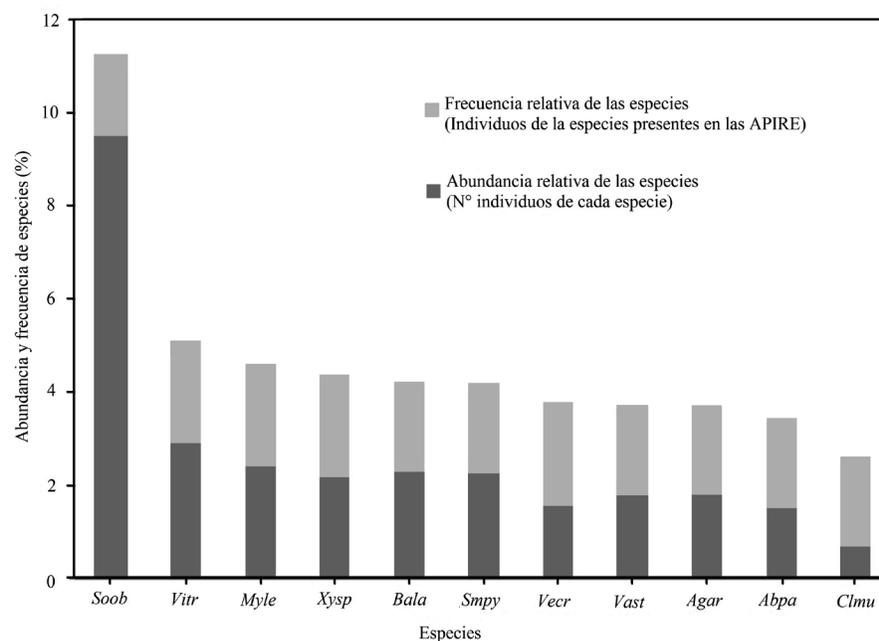


Figura 2. Porcentaje de abundancia de las especies en los procesos de restauración realizados por el Jardín Botánico de Bogotá entre el año 2012 y 2015, Agar (*A. aristei*), Abpa (*A. parviflora*), Bala (*B. latifolia*), Clmu (*C. multiflora*), Myle (*M. leucoxylla*), Smpy (*S. pyramidalis*), Soob (*S.oblongifolium*), Vast (*V. stipularis*), Vecr (*V. crassiramea*), Vitr (*V. triphyllum*) y Xyisp (*X. spiculifera*).

El 71.6 % restante corresponde a 102 especies (85 665 ind), cada una de estas aporta menos del 0.06 % de los individuos reintroducidos.

Los individuos de las especies *M. leucoxylla* y *X. spiculifera* presentan áreas foliares más pequeñas (0.59 ± 0.11 y 0.72 ± 0.09 mm², respectivamente) y se diferenciaron significativamente del resto de las especies ($P < 0.001$). Las otras especies presentaron áreas foliares entre 0.73 ± 0.18 y 1.74 ± 0.53 mm², diferenciándose tan solo en pares particulares. Sin embargo, *S. oblongifolium* con 1.31 ± 0.33 mm² registró el mayor valor para este atributo. En

contraste, para AFE solo *B. latifolia* (238.02 ± 43.85 cm².g⁻¹) y *X. spiculifera* (106.43 ± 20.33 cm².g⁻¹) son significativamente diferentes de las demás especies ($P < 0.001$). El comportamiento del CFMS fue similar al AFE para todas las especies (figura 3).

V. stipularis presenta el mayor dB (0.62 g.cm⁻³) y *S. oblongifolium* el menor dB (0.41 g.cm⁻³), aspecto que puede estar relacionado con las estrategias de adaptación de las especies; en general, las especies presentan densidades entre 0.45 y 0.58 g.cm⁻³. En altura, las especies *M. leucoxylla* y *A. parviflora* son las especies que alcanzan el estrato

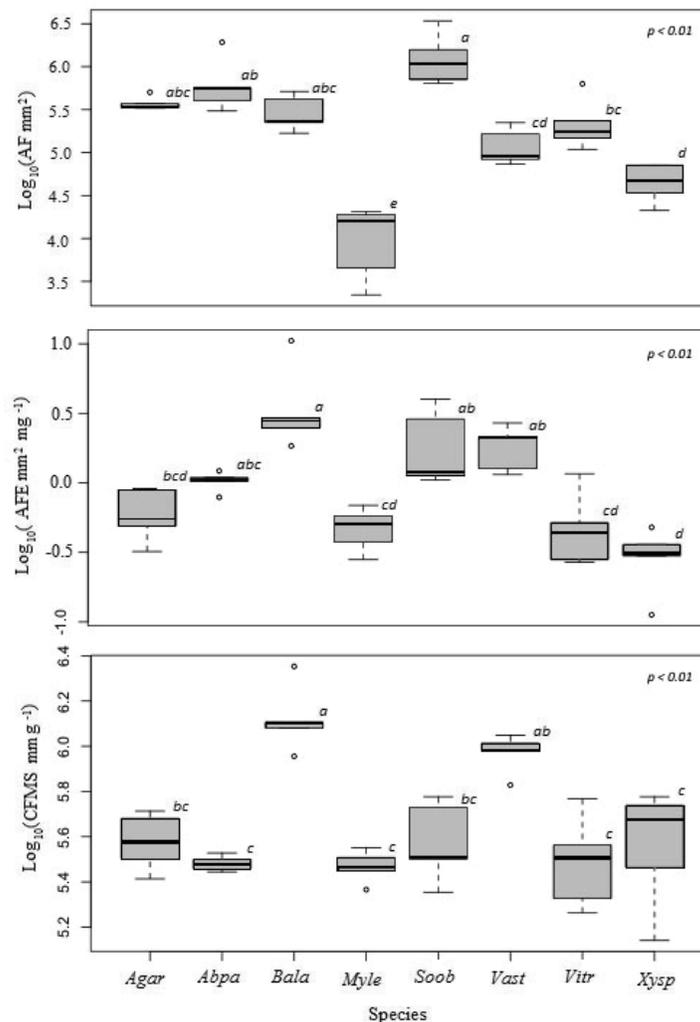


Figura 3. Atributos foliares por especie, AF (área foliar), AFE (área foliar específica), CFMS (contenido foliar de materia seca, Agar (*A. aristei*), Abpa (*A. parviflora*), Bala (*B. latifolia*), Myle (*M. leucoxylla*), Soob (*S. oblongifolium*), Vast (*V. stipularis*), Vitr (*V. triphyllum*) y Xysp (*X. spiculifera*), especies con letras diferentes presentan diferencias significativas.

arbóreo (25 y 20 m respectivamente), mientras que *A. aristei* y *B. latifolia* son especies arbustivas que alcanzan 3.5 y 4 m (figura 4).

En el ACP, que explica el 76 % del comportamiento de las especies (32 % en el componente uno y del 44 % en el componente dos), se lograron identificar tres grupos principales de plantas: el primer grupo está conformado por las especies *B. latifolia* y *V. stipularis*, las cuales están relacionadas con altos valores de CFMS y AFE; el segundo grupo se conforma por *M. leucoxylla*, *A. aristei*, *V. triphyllum* y *X. spiculifera*, relacionados con valores de altura y altos valores de dB; y un tercer

grupo conformado por *S. oblongifolium* y *A. parviflora*, con los mayores valores de AF (figura 5).

De acuerdo al análisis del clúster, en el primer conglomerado se muestra la agrupación de las especies de acuerdo a la abundancia de cada una de las zonas, donde se generan tres grupos principales. El primero de especies abundantes con más del 26 % del total de individuos (*V. triphyllum*, *M. leucoxylla* y *X. spiculifera*); el segundo, de la especie más abundante con el 32.5 % del total de individuos y presente en las ocho Apire (*S. oblongifolium*); y el tercero, especies con abundancia entre el 5 % y 6 % del total de individuos, y presentes

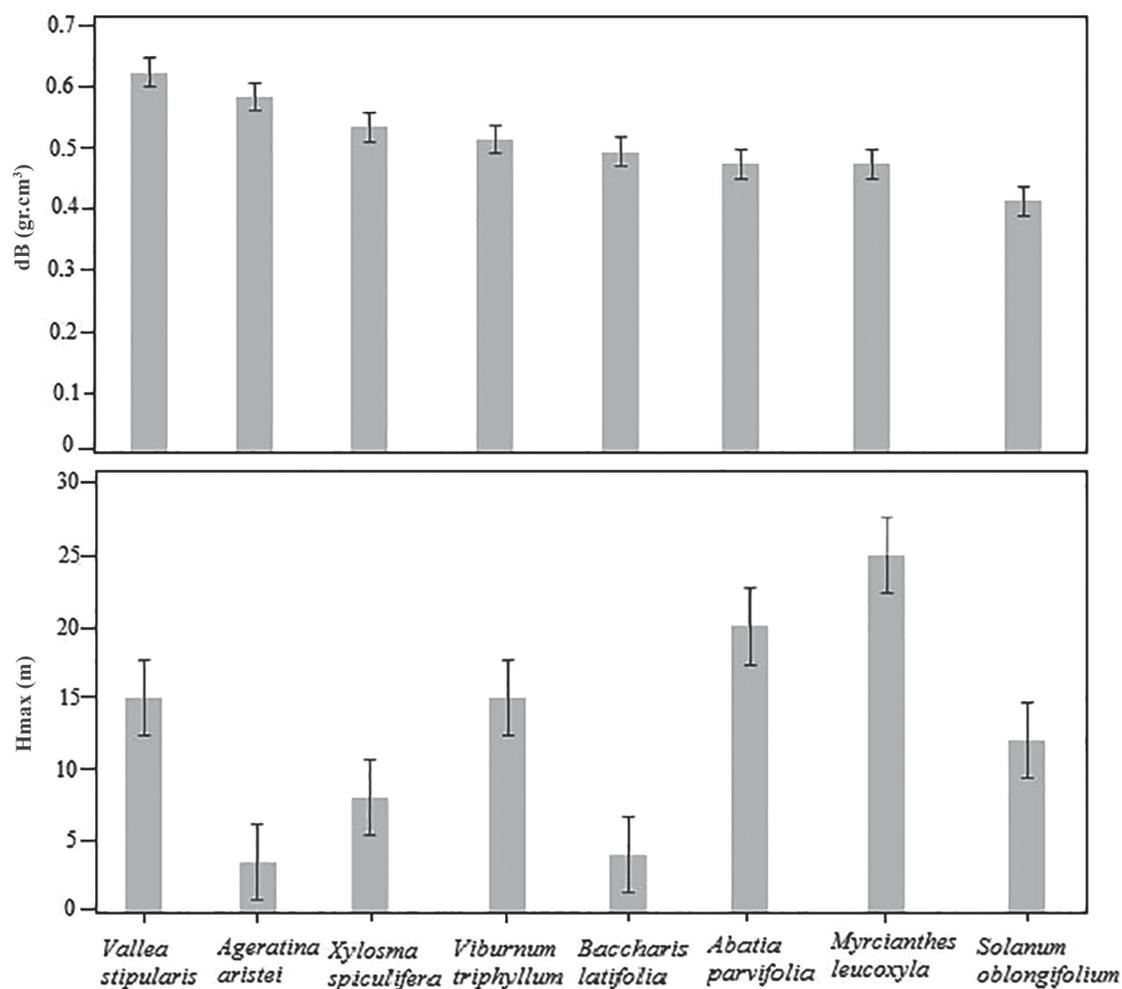


Figura 4. Densidad básica y altura por especie, dB (densidad básica de la madera), Hmax (altura máxima que puede alcanzar los individuos de la especie).

en al menos siete de las ocho áreas (*B. latifolia*, *A. parviflora*, *A. aristei* y *V. stipularis*) (figura 5).

En el segundo conglomerado se puede apreciar parentesco de las especies (divergencia filogenética). El clúster indica menor relación entre especies en las medidas que hay mayor separación de las ramas, donde se conforman tan solo dos grupos, lo que demuestra que, aunque se empleen diferentes especies a nivel filogenético la diversidad trabajada en los procesos de restauración ecológica es baja. En contraste en el último conglomerado, se encuentra la agrupación de las especies a partir de las características funcionales, identificando los tres grupos encontrados en la misma agrupación que en ACP. Lo que nos muestra que, aunque la

diversidad filogenética es baja, a nivel funcional se presentan tres grupos definidos que varían en sus características y, por tanto, existe una compensación a nivel funcional de las especies (figura 6).

Pese a que la riqueza de especies es alta (113 especies) la abundancia de individuos está concentrada en pocas especies (11 especies), lo que nos muestra que la diversidad funcional y filogenética es baja, pero teniendo en cuenta los objetivos a corto plazo de los procesos de restauración ecológica que buscan recuperar la cobertura vegetal, estructura del suelo y control de factores de tensión, fundamental en las primeras etapas en los que se encuentran los procesos de restauración ecológica con menos de cuatro años de implementación.

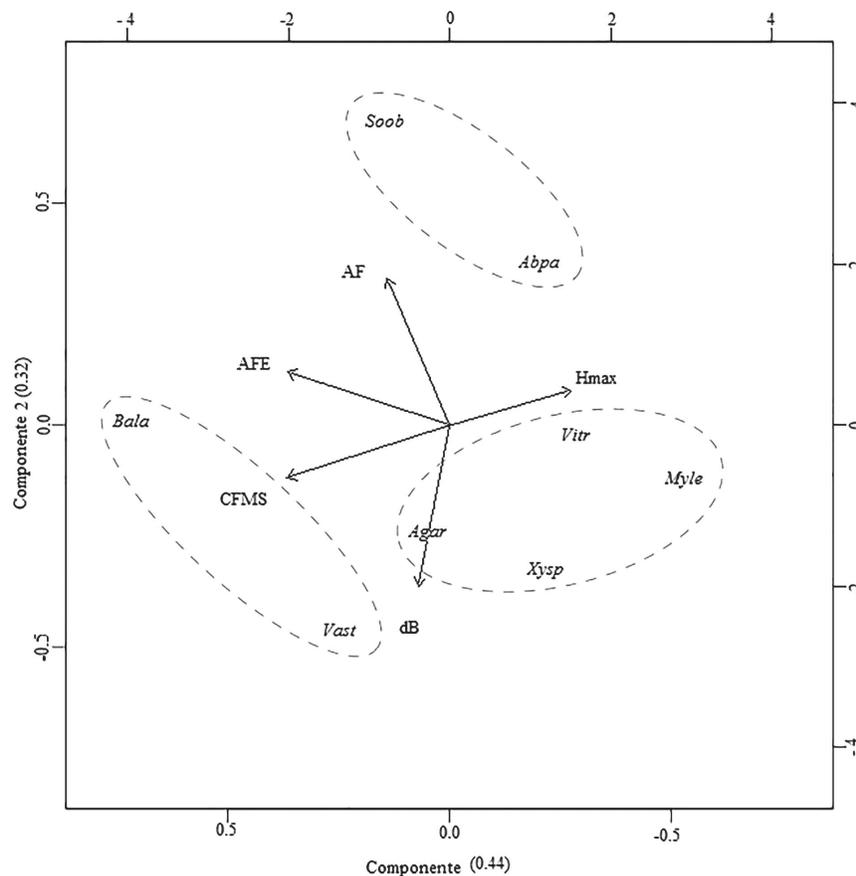


Figura 5. Análisis de componentes principales, Agar (*A. aristei*), Abpa (*A. parviflora*), Bala (*B. latifolia*), Myle (*M. leucoxylla*), Soob (*S. oblongifolium*), Vast (*V. stipularis*), Vitr (*V. triphyllum*) y Xysp (*X. spiculifera*). dB (densidad básica de la madera), AF (área foliar), AFE (Área foliar específica), CFMS (contenido foliar de materia seca), Hmax (altura máxima de las especies).

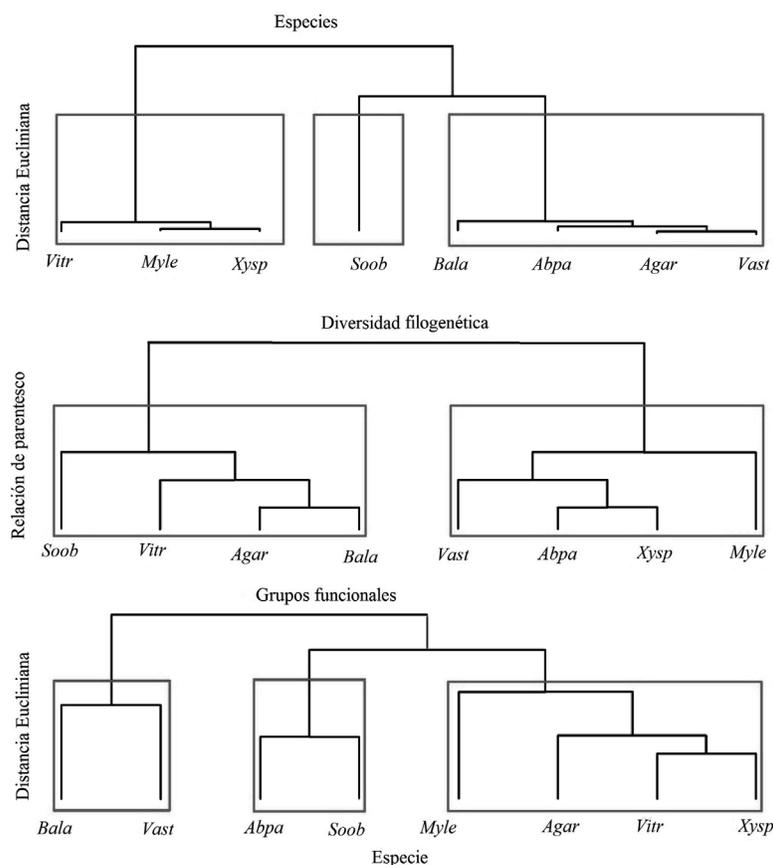


Figura 6. Análisis de conglomerado de acuerdo a la frecuencia y abundancia de las especies en las APIRE, diversidad filogenética y atributos funcionales, Agar (*A. aristei*), Abpa (*A. parviflora*), Bala (*B. latifolia*), Myle (*M. leucoxylla*), Soob (*S. oblongifolium*), Vast (*V. stipularis*), Vittr (*V. triphyllum*) y Xysp (*X. spiculifera*).

DISCUSIÓN

Las ocho especies más empleadas en las áreas de restauración ecológica que el Jardín Botánico de Bogotá ha reintroducido entre los años 2012 a 2015, conforman tres grupos que presentan diferencias a nivel funcional dentro de las áreas, generando limitaciones y oportunidades para su establecimiento.

El primer grupo lo conforman las especies *S. oblongifolium* y *A. parviflora* que presentan los mayores valores de AF, las cuales son más resistentes a áreas frías, presentan mayor capacidad fotosintética indispensable para la creación de tejidos y aspectos productivos de las plantas, con mayor captación y uso de los recursos, manteniendo

altas tasas de adquisición de recursos, equilibrando los costos de construcción de la hoja con el potencial de crecimiento. (Wilson *et al.*, 1999; Lüscher *et al.*, 2001; Warnock *et al.*, 2006; Díaz *et al.*, 2016). Adicionalmente, se encontró que las especies que presentan mayor tamaño de hoja (AF), presentan menor densidad de madera, respuesta que se debe a la inversión de más energía en mantener altas tasas de recambio, hojas poco costosas y altas tasas fotosintéticas para maximizar la captura de recursos, más que en generar tallos con altas resistencias comportándose como especies más adquisitivas (Pickup *et al.*, 2005; Lohbeck *et al.*, 2015).

El segundo grupo conformado por *B. latifolia* y *V. stipularis* relaciona las especies con mayores AFE, asociadas a mejor uso de recursos, produciendo

más hojas, pero siendo más susceptibles a la herbívora y con menor longevidad foliar, por lo que son recomendadas para ambientes con muchos nutrientes. En contraste las especies con menor AFE (*V. triphyllum*, *X. spiculifera*, *A. aristei* y *M. leucoxylla*) se concentran en la retención de recursos, siendo más apropiadas en zonas con menor disponibilidad de nutrientes (Poorter & De Jong, 1999; Wilson *et al.*, 1999; Marengo *et al.*, 2009). El AFE se relaciona de manera directa con la disponibilidad de recursos y con la disponibilidad de lumínica (Hodgson *et al.*, 2011), además de relacionarse de manera positiva con los contenidos de nitrógeno en las hojas (Gulías *et al.*, 2003). Sin embargo, no se relaciona con el tamaño de hoja (Wilson *et al.*, 1999; Ackerly *et al.*, 2002). En el trabajo desarrollado por Melo-Cruz *et al.* (2012), para cinco especies nativas andinas de la cordillera oriental en áreas en proceso de restauración ecológica, se registró variabilidad en las características foliares, aspecto similar al encontrado para las especies evaluadas en este estudio, donde se incluyen especies de diferente origen taxonómico y características funcionales.

El tercer grupo está conformado por *M. leucoxylla*, *A. aristei*, *V. triphyllum* y *X. spiculifera*, y se relacionan con mayores valores de Hmax y dB. Las especies tolerantes a la luz o pioneras, presentan una relación inversa con la dB (Gelder *et al.*, 2006), las especies que requieren luz (King *et al.*, 2005) y tiene poca competencia intra e interespecífica (Kunstler *et al.*, 2015), presentan un mayor crecimiento en altura y una alta capacidad fotosintética, y se caracterizan por tener bajas. Por otro lado, especies con altas dB se ha observado que tiene una relación con la tolerancia a la sequía (Hacke *et al.*, 2001). En general, el grupo de especies en nuestro estudio que se relaciona con la densidad de madera presenta densidades entre 0.45 y 0.60 g.cm⁻³, densidad considerada como media, lo que indica que presentan compensaciones entre características adquisitivas y características conservativas que les permiten adaptarse al medio (Puertas *et al.*, 2013).

A nivel filogenético se encuentran dos grupos y se ha reportado que especies con relaciones estrechas en su filogenia tienden también a presentar características similares en sus rasgos funcionales (Ackerly, 2009; Flynn *et al.*, 2011). No obstante, como se aprecia en este estudio, estas similitudes no se observaron ya que existen diferencias a nivel de grupo funcional. Es posible que se deba a las adaptaciones de las especies en respuesta a factores ambientales, debido a que existen múltiples combinaciones de los atributos funcionales para cumplir una misma función o proceso determinado (Díaz *et al.*, 2013). Ningún atributo aislado puede cumplir con procesos o funciones ecosistémicas, por el contrario, requiere la combinación y compensaciones de diferentes estrategias y rasgos para cumplir con ello. Así que los tres grupos funcionales encontrados y su filogenia, muestra agrupaciones de especies que están emparentadas y cumplen funciones similares, pero que pueden emplear estrategias diferentes (variación de rasgos funciones entre las especies), para cumplir su función en el ecosistema (Maherali & Klironomos, 2007).

CONCLUSIONES

Se identificaron tres grupos funcionales. El primero de ellos está relacionado con el AF, se trata de especies tolerantes a la luz, con rápido crecimiento y tasas de recambio altas comportándose como especies adquisitivas. Un segundo grupo relacionado a AFE y CFMS, con especies de altos contenidos nutricionales en las hojas y menor longevidad foliar; y un tercer grupo relacionado a la Hmax de las especies y la dB, donde las especies con menores densidades presentan mayores crecimientos y menor altura. Los dos últimos grupos presentan características de especies adquisitivas y conservativas.

La respuesta de las especies que presentan ya sea de características adquisitivas o conservativas, se constituye en un factor importante a tener en cuenta para la selección de especies y su incorporación en diferentes espacios y momentos del

proceso de restauración ecológica. Además, se debe tener en cuenta el grado de perturbación del área, la disponibilidad de recursos en el medio, la estructura y composición de la cobertura vegetal establecida y la funcionalidad del sistema en su conjunto.

Adicionalmente, se encontró que, aunque las especies empleadas en los procesos de restauración ecológica conforman dos grupos de acuerdo a sus similitudes filogenéticas: a nivel funcional aumenta el número en un grupo, indicando que las especies presentan diferentes mecanismos y estrategias de adaptación, lo que corrobora que la combinación de diferentes atributos funcionales y en diferentes proporciones pueden contribuir a diferentes procesos ecosistémicos. Aunque el mayor número de individuos reintroducidos en las Apire involucra pocas especies, se aporta a la recuperación de las funciones ecológicas gracias a la combinación de atributos funcionales de estas especies. La estrategia de las especies empleadas está asociada a la adquisición de recursos, estrategia indispensable para la recuperación de zonas disturbadas ya que induce una rápida recuperación de la cobertura vegetal. Sin embargo, es claro que la restauración es a largo plazo, por lo cual se recomienda involucrar grupos funcionales con rasgos conservativos, de tal manera que se continúe con los procesos de restauración ecológica, teniendo en cuenta el sistema de referencia, los mecanismos ecológicos que se deseen facilitar de acuerdo con los objetivos planteados para cada escenario.

Para activar el proceso sucesional en la fase inicial de implementación de las actividades de restauración ecológica, se incorporó un grupo de especies dominantes con la finalidad de actuar como especies facilitadoras en la recuperación de la cobertura vegetal, estructura del suelo y control de los factores de tensión. Una vez concluida esta fase, y como parte de la evaluación, se recomienda continuar con la incorporación de otras especies e incrementar el número de individuos de las especies que se han incluido en las Apire, pero no

se incluyen en este análisis, dado que aportan nuevos componentes y características estructurales y funcionales que dan mayor complejidad al ecosistema, permitiendo mayor autosostenibilidad.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackerly, D., Knight, C., Weiss, S., Barton, K., & Starmer, K.** (2002). Leaf size, specific leaf area and microhabitat distribution of chaparral woody plants: Contrasting patterns in species level and community level analyses. *Oecologia*, 130(3), 449-457. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420100805>
- Ackerly, D.** (2009). Conservatism and diversification of plant functional traits: Evolutionary rates versus phylogenetic signal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 19699-19706. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0901635106>
- Barrera-Cataño, J., & Valdés-López, C.** (2007). Herramientas para abordar la restauración ecológica de áreas disturbadas en Colombia. *Universitas Scientiarum*, 12(2), 11-24.
- Barrera-Cataño, J., Contreras-Rodríguez, S., Garzón-Yepes, N., Moreno-Cárdenas, A., & Montoya-Villarreal, S.** (2010). *Manual para la restauración ecológica de los ecosistemas disturbados del Distrito Capital*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente-Pontificia Universidad Javeriana. 403 p.
- Benayas, R., Newton, A., Diaz, A., & Bullock, J.** (2009). Enhancement of biodiversity and ecosystem

- services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 325(5944), 1121-1124. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1172460>
- Castellanos-Castro, C., & Bonilla, M.** (2011). Grupos funcionales de plantas con potencial uso para la restauración en bordes de avance de un bosque altoandino. *Acta Biológica Colombiana*, 16(1), 153-174.
- Casanoves, F., Pla, L., & Rienzo, J. (eds.).** (2011). *Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie). 834 p.
- Chapin F.** (1993). Functional role of growth forms in ecosystem and global processes. In *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*, 287-312. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-233440-5.50024-5>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S. L., Swenson, N., & Zanne, A.** (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4), 351-366. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Cornelissen, J., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D., Reich, P., Ter Steege, H., Morgan, H., Heijden, M., Pausas, J., & Poorter, H.** (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335-380. DOI: <https://doi.org/10.1071/BT02124>
- Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J., Wright, I., Lavorel, S., Dray, S., & Garnier, E.** (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529(7585), 167-171. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16489>
- Díaz, S., Purvis, A., Cornelissen, J., Mace, G., Donoghue, M., Ewers, R., & Jordano, P.** (2013). Functional traits, the phylogeny of function, and ecosystem service vulnerability. *Ecology and Evolution*, 3(9), 2958-2975. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.601>
- Duffy, J., France, K., McIntyre, P., Thebault, E., & Loreau, M.** (2007). The functional role of biodiversity in ecosystems: incorporating trophic complexity. *Ecology Letters*, 10, 522-538. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01037.x>
- Flynn, D., Mirotchnick, N., Jain, M., Palmer, M., & Naeem, S.** (2011). Functional and phylogenetic diversity as predictors of biodiversity—ecosystem-function relationships. *Ecology*, 92(8), 1573-1581. DOI: <https://doi.org/10.1890/10-1245.1>
- Gelder, H., Poorter, L., & Sterck, F.** (2006). Wood mechanics, allometry, and life-history variation in a tropical rain forest tree community. *The New phytologist*, 171(2), 367-78. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01757.x>
- Gulías, J., Flexas, J., Mus, M., Cifre, J., Lefi, E., & Medrano, H.** (2003). Relationship between maximum leaf photosynthesis, nitrogen content and specific leaf area in Balearic endemic and non-endemic Mediterranean species. *Annals of Botany*, 92(2), 215-222. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcg123>
- Hacke, U., Sperry, J., Pockman, W., Davis, S., & Mc Cullough, K.** (2001). Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. *Oecologia*, 126(4), 457-461. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004420100628>
- Hawkins C., & Macmahon, J.** (1989). Guilds: the multiple meanings of a concept. *Annual Review of Entomology*, 34, 423-451. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.en.34.010189.002231>
- Hodgson, J., Montserrat-M, G., Charles, M., Jones, G., Wilson, P., Shipley, B., & Sharafi, M.** (2011). Is leaf dry matter content a better predictor of soil fertility than specific leaf area? *Annals of Botany*, 108(7), 1337-1345. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcr225>
- King, D., Davies, S., Nur Supardi, M., & Tan, S.** (2005). Tree growth is related to light interception and wood density in two mixed dipterocarp forests of Malaysia. *Functional Ecology*, 19(3), 445-453. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.00982.x>
- Kunstler, G., Falster, D., Coomes, D., Hui, F., Kooyman, R., Laughlin, D., Poorter, L.** (2015). Plant functional traits have globally consistent effects on competition. *Nature*, 529(7585), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16476>
- Leps, J., Bello, F., Lavorel, S., & Berman, S.** (2006). Quantifying and interpreting functional diversity of

- natural communities: practical considerations matter. *Preslia*, 78, 481-501.
- Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J., Hector, A., & Hooper, D.** (2001). Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 294(5543), 804-8. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1064088>
- Lohbeck, M., Lebrija-Trejos, E., Martínez-Ramos, M., Meave, J., Poorter L., & Bongers, F.** (2015). Functional trait strategies of trees in dry and wet tropical forests are similar but differ in their consequences for succession. *PLoS one*, 10(4), e0123741. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123741>
- Lüscher, A., Stäheli, B., Beaun, R., & Nösberger, J.** (2001). Leaf area, competition with grass, and clover cultivar: Key factors to successful overwintering and fast regrowth of white clover (*Trifolium repens* L.) in spring. *Annals of Botany*, 88, 725-735. DOI: <https://doi.org/10.1006/anbo.2001.1509>
- Maherali, H., & Klironomos, J.** (2007). Influence of phylogeny on fungal community assembly and ecosystem functioning. *Science*, 316, 1746-1748. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1143082>
- Marengo, R., Antezana-Vera, S., & Nascimento, H.** (2009). Relationship between specific leaf area, leaf thickness, leaf water content and SPAD-502 readings in six Amazonian tree species. *Photosynthetic*, 47(2), 184-190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11099-009-0031-6>
- Martín-López, B., González, J., Díaz, S., Castro, I., & García-Llorente, M.** (2007). Biodiversidad y bienestar humano: el papel de la diversidad funcional. *Ecosistemas*, 16(3), 69-80.
- Mayer, P.** (2006). Biodiversity—The appreciation of different thought styles and values helps to clarify the term. *Restoration Ecology*, 14(1), 105-111. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00111.x>
- Melo-Cruz, O., Rodríguez-Santos, N., & Rojas-Ramírez, F.** (2012). Patrones de arquitectura foliar asociados al crecimiento funcional de cinco especies leñosas nativas de la cordillera oriental utilizadas en restauración ecológica en la sabana de Bogotá. *Colombia Forestal*, 15(1), 119-130. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.1.a04>
- Moore, J.** (2001). Diversity taxonomic versus Functional. University of Northern Colorado. *Encyclopedia of Biodiversity*. vol II. Colorado, EE. UU. p 205-215. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-226865-2/00078-X>
- Murcia, C., & Guariguata, M.** (2014). La restauración ecológica en Colombia: tendencias, necesidades y oportunidades. Occasional Paper. Bogor, Indonesia: Centro para la investigación Forestal Internacional (Cifor). 107 p.
- Ostertag, R., Warman, L., Cordell, S., & Vitousek, P.** (2015). Using plant functional traits to restore Hawaiian rainforest. *Journal of Applied Ecology*, 52(4), 805-809. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12413>
- Poorter, H., & De Jong, R.** (1999). A comparison of specific leaf area, chemical composition and leaf construction costs of field plants from 15 habitats differing in productivity. *New Phytologist*, 143(1), 163-176. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00428.x>
- Puertas, P., Guevara, C., & Espinoza, M.** (2013). Manual de transformación de maderas. Lima: Organización Internacional de Maderas (OIMT). 122 p.
- Pickup, M., Westoby, M., & Basden, A.** (2005). Dry mass costs of deploying leaf area in relation to leaf size. *Functional Ecology*, 19(1), 88-97. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0269-8463.2005.00927.x>
- Reich, P.** (2014). The world-wide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto. *Journal of Ecology*, 102, 275-301. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12211>
- R Core Team.** (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de: <https://www.R-project.org/>
- Salgado-Negret, B. (ed).** (2015). La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 236 p.

- Schneider, C., Rasband, W., & Eliceiri, K.** (2012). ImageJ. "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis". *Nature methods*, 9(7), 671-675. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Solorza, J.** (2016). Investigación en áreas piloto de restauración ecológica ("Apires"). *Scientific journal, Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Bio-Síntesis*, 1(1), 5.
- Squeo, F., Olivares, N., Olivares, S., Pollastri, A., Aguirre, E., Aravena, R., Jorquera, C., & Ehleringer, J.** (1999). Grupos funcionales en arbustos desérticos del norte de Chile, definidos sobre la base de las fuentes de agua utilizadas. *Gayana Botanica*, 56(1), 1-15.
- The Angiosperm Phylogeny Group.** (2009), An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161, 105-121. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.00996.x>
- Violle, C., Navas, M., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E.** (2007). Let the concept of trait be functional. *Oikos*, 116, 882-892. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2007.15559.x>
- Warnock, R., Valenzuela, J., Trujillo, A., Madriz, P., & Gutiérrez, M.** (2006). Área foliar, componentes del área foliar y rendimiento de seis genotipos de Ca-raota. *Agronomía Tropical*, 56(1), 21-42.
- Webb, C., Ackerly, D., & Kembel, S.** (2008). Phylocom: software for the analysis of phylogenetic community structure and trait evolution. *Bioinformatics*, 24, 2098-2100. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btn358>
- Wright, I., Reich, P., Westoby, M., Ackerly, D., Baruch, Z., Bongers, F., & Cavender-Bares, J.** (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821-827. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Wilson, P., Thompson, K., & Hodgson, J.** (1999). Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist*, 143(1), 155-162. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00427.x>
- Wortley, L., Hero, J., & Howes, M.** (2013). Evaluating ecological restoration success: A review of the literature. *Restoration Ecology*, 21, 537-543. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12028>



RIQUEZA FLORÍSTICA Y RECAMBIO DE ESPECIES EN LA VERTIENTE ORINOQUENSE DE LOS ANDES, COLOMBIA

Plant species richness and turnover in the Orinoco slope of the Andes in Colombia

William Trujillo-C.¹ & María Mónica Henao-Cárdenas²

Trujillo-C.W., & Henao-Cárdenas, M.M. (2018). Riqueza florística y recambio de especies en la vertiente orinoquense de los andes, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(1), 18-33

Recepción: 2 de mayo de 2017

Aceptación: 28 de agosto de 2017

Resumen

El mecanismo de neutralidad propone que la diversidad beta es controlada por limitaciones de dispersión y que la similitud florística está correlacionada con la distancia geográfica. En este trabajo se evaluó dicha hipótesis y se comparó la riqueza de bosques subandinos de la Orinoquía con otras vertientes en Colombia, Ecuador y Perú. Se usó una prueba de Mantel para evaluar la correlación entre distancia y similitud florística en 19 parcelas de 0.1 ha y una prueba de Mann-Whitney para el análisis comparativo de riqueza. Se encontró que la distancia fue buen predictor de la similitud florística, sugiriendo que las limitaciones de dispersión son un mecanismo importante para explicar el recambio. La riqueza hallada (47–84 especies) fue significativamente más baja que en las vertientes Amazonía y Pacífico de los Andes, pero similar a la reportada en la vertiente Magdalena. La composición florística estuvo de acuerdo con el patrón reportado previamente para Orinoquía.

Palabras clave: bosque ribereño, bosque de tierra firme, diversidad beta, Orinoquía, similitud florística.

Abstract

The neutral theory proposes that the beta diversity is controlled by dispersal limitations and that the floristic similarity between communities is correlated with geographic distances. This work evaluated this hypothesis and compared the richness of Orinoco's subandine forests with forests in other slopes in Colombia, Ecuador and Peru. The Mantel test was used to evaluate the correlation between distance and floristic similarity in 19 plots of 0.1 ha and the Mann-Whitney test for a comparative richness analysis. We found that distance was a good predictor of floristic similarity, suggesting that dispersal limitations represent an important mechanism to explain species replacement. The richness found in the Orinoquia slope (47-84 species) was significantly lower than the Amazon and Pacific slopes of the Andes, but was similar to the one reported in the Magdalena slope. Finally, we found a similar plant species composition to that previously reported for Orinoquia.

Key words: riparian forest, terra firme forests, beta diversity, Orinoquia, floristic similarity.

1 Fundación Reserva Natural La Palmita. Bogotá, Colombia. williamtrujilloca@gmail.com Autor para correspondencia.

2 Fundación Reserva Natural La Palmita. Bogotá, Colombia. mmcardenas@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

Una buena parte de las investigaciones que se han enfocado en evaluar los determinantes ecológicos en el neotrópico han proporcionado evidencia de que el ensamblaje de nicho es un importante mecanismo para explicar la composición y el recambio de especies en comunidades de plantas (Potts *et al.*, 2002; Phillips *et al.*, 2003; Tuomisto *et al.*, 2003; Prada & Stevenson, 2016; Zamborlini *et al.*, 2016). El ensamblaje de nicho predice que los factores ambientales determinan la presencia o ausencia de especies y, por tanto, la variación de la composición entre los sitios (Whittaker, 1956; Hutchinson, 1957).

Otros estudios, por el contrario, demuestran que las variables espaciales son más importantes que las ambientales para explicar la similitud y el recambio florístico (Condit *et al.*, 2002; Duivenvoorden *et al.*, 2002; Duque *et al.*, 2002; Vormisto *et al.*, 2004). Por ejemplo, el trabajo de Terborgh & Andresen (1998) en la Amazonía encontró que los bosques inundables no fueron similares florísticamente a otros bosques del mismo tipo y que la similitud florística fue debida a la proximidad geográfica entre sitios. Este patrón ha sido explicado mediante procesos estocásticos (Cornell & Lawton, 1992; Hubbell *et al.*, 1999; Bell, 2001), sugiriendo que no son las variables ambientales sino las limitaciones de dispersión las que determinan la similitud florística y el recambio de especies, el cual opera con mayor fuerza en escalas geográficas amplias que en pequeñas (Normand *et al.*, 2006; López & Duque, 2010).

El piedemonte y los bosques subandinos representan subunidades de paisaje de alta importancia biogeográfica, pues se encuentran en la transición entre la sabana y la montaña de la Orinoquía y albergan la mayor proporción de la riqueza florística en la región (Minorta & Rangel, 2015). En el piedemonte, los bosques ribereños y de tierra firme son valiosas coberturas dado que en sus relictos se encuentra contenida la mayor parte de las especies con forma de vida arbórea en esta ecorregión

(Rangel, 1995). Los bosques ribereños son ecosistemas asociados a cuerpos de agua que se inundan periódicamente y reciben su influencia regular (Neiman & Decamps, 1997). Es bien documentado que un aumento en la duración, la intensidad y la frecuencia de las inundaciones en bosques ribereños puede conducir a un cambio en la composición de especies (Ferreira *et al.*, 2009; Wittmann *et al.*, 2013). Ya que el exceso de inundación reduce la diversidad local al excluir especies arbóreas intolerantes a la anoxia del suelo (Garsen *et al.*, 2015), seguido por la sustitución de especies adaptadas a las condiciones, debido a estrategias de historia de vida especializadas (Purcell, 2016).

Aunque un buen número de artículos se han enfocado en dilucidar los mecanismos que controlan la riqueza florística y la diversidad beta en el neotrópico, son escasos los trabajos en la vertiente orinoquense de los Andes, una región que se caracteriza por la acelerada transformación de los ecosistemas naturales y los vacíos de información florística (Córdoba *et al.*, 2011). Los análisis de la riqueza son importantes para entender los patrones de la biodiversidad (Calderón *et al.*, 2012), que serán determinantes para plantear acciones de conservación y predecir los efectos de posibles cambios generados por factores naturales o antrópicos (Kessler *et al.*, 2011). Así mismo, se ha sugerido la necesidad de comprender mejor los procesos y patrones subyacentes al mantenimiento y la pérdida de la diversidad beta para conservar efectivamente la diversidad gamma (Socolar *et al.*, 2016).

Basado en lo anterior, este artículo plantea aportar al conocimiento de la diversidad alfa y beta en el piedemonte y bosques subandinos de la Orinoquía, a partir de los siguientes objetivos: 1) medir la composición y riqueza florística y evaluar su variación respecto a otras vertientes andinas del neotrópico; 2) evaluar el recambio de especies entre bosques ribereño, bosques de tierra firme y bosques subandinos y analizar la importancia relativa de la distancia geográfica y el régimen de inundación como controladores de la diversidad beta en bosques de la vertiente orinoquense de los Andes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la región de la Orinoquía, sobre las cuencas hidrográficas de los ríos Pauto (departamento de Casanare) y Casanare (departamento de Arauca), grandes tributarios de la cuenca del río Orinoco; en bosques de piedemonte y subandinos. El piedemonte se ubica en un rango altitudinal de 300-1100 m de altitud (Garavito *et al.*, 2011) y representa la transición entre la vegetación de cordillera y la vegetación de sabana (Rodríguez *et al.*, 2004; Minorta & Rangel, 2015). Este hábitat natural se caracteriza por presentar un clima húmedo tropical, con temperatura promedio de 27°C que pueden disminuir 3°C en época de máxima precipitación entre mayo y julio, o aumentar casi 10°C en época de máxima sequía entre febrero y marzo (Rangel, 1995).

Los bosques subandinos se encuentran entre 950 y 2400 m de altitud; la temperatura media anual oscila entre 16° y 23°C, con un periodo seco de tres meses (IGAC, 1999); suelos de escaso desarrollo génico, desaturados, ácidos y de muy baja fertilidad; el relieve varía de moderadamente

empinado hasta escarpado, con pendientes entre 12-75 % (IGAC, 2014).

Los muestreos de vegetación se realizaron en ocho localidades (tabla 1, figura 1) en tres tipos de cobertura. Las coberturas de muestreo fueron: 1) bosques ribereños en el piedemonte de los departamentos Casanare y Arauca, ubicados entre los 390-550 m de altitud, caracterizados por ser zonas transicionales influenciadas regularmente por aguas continentales y que se extienden desde las márgenes de los cursos de agua hacia los límites o las zonas netamente terrestres (Naiman & Decamps, 1997); esta denominación incluye tanto los bosques ubicados en planos de inundación como en los diques de ribera. 2) bosques primarios de tierra firme del piedemonte de Casanare y Arauca ubicados entre los 305-546 m de altitud, que no se encuentran en la ribera de los ríos y no reciben su influencia regular, aunque pueden llegar a tener alto nivel freático o estar atravesados por cuerpos de agua menores; en el área de estudio, esta cobertura presenta niveles medios a bajos de disturbio, causado principalmente por extracción selectiva de especies maderables. 3) bosques subandinos del departamento de Casanare, ubicados en altitudes entre 1500-2000 m sobre pendientes medias a altas.

Tabla 1. Información geográfica de los puntos de muestreo en bosques subandinos y de piedemonte de la vertiente orinoquense de la Cordillera Oriental de los Andes en Colombia

Hábitat natural	Departamento	Municipio	Vereda	Tipo de bosque	Acrónimo parcelas	Coordenadas	Altitud (m)
Bosque subandino	Casanare	Recetor	Los Alpes	BS	AR-10, AR-12	5°19'59"N-72°46'30"W	1913
	Casanare	Chámeza	Brisas del Tonce	BS	BT-9, BT-11	5°15'10"N-72°51'48"W	1490
Piedemonte	Arauca	Tame	El Banco	BR BTF	BP-1, BP-17 EB-18, EB-20	6°16'03"N-71°51'48"W 6°15'54"N-71°54'25"W	390 450
	Arauca	Tame	Caribabare	BTF	CA-4* CA-5	6°16'37"N-71°45'60"W 6°17'1"N-71°46'41"W	290 305
	Arauca	Tame	Puna Puna	BTF	PU-6, PU-20	6°19'38"N-71°46'23"W	305
	Casanare	Támara	Quebrada Honda	BR	QH-13, QH-15 CS-14*	5°48'1"N-72°6'14"W 5°48'14"N-72°6'8"W	460 556
	Casanare	Támara	San Pedro	BR	SP-2, SP-3	5°45'11"N-72°12'4"W	550
	Casanare	Támara	Tabloncito	BTF	TA-1, TA16	5°47'38"N-72°12'43"W	546

BR=bosque ribereño de piedemonte, BTF=bosque de tierra firme de piedemonte, BS=bosque subandino, *bosque secundario tardío.

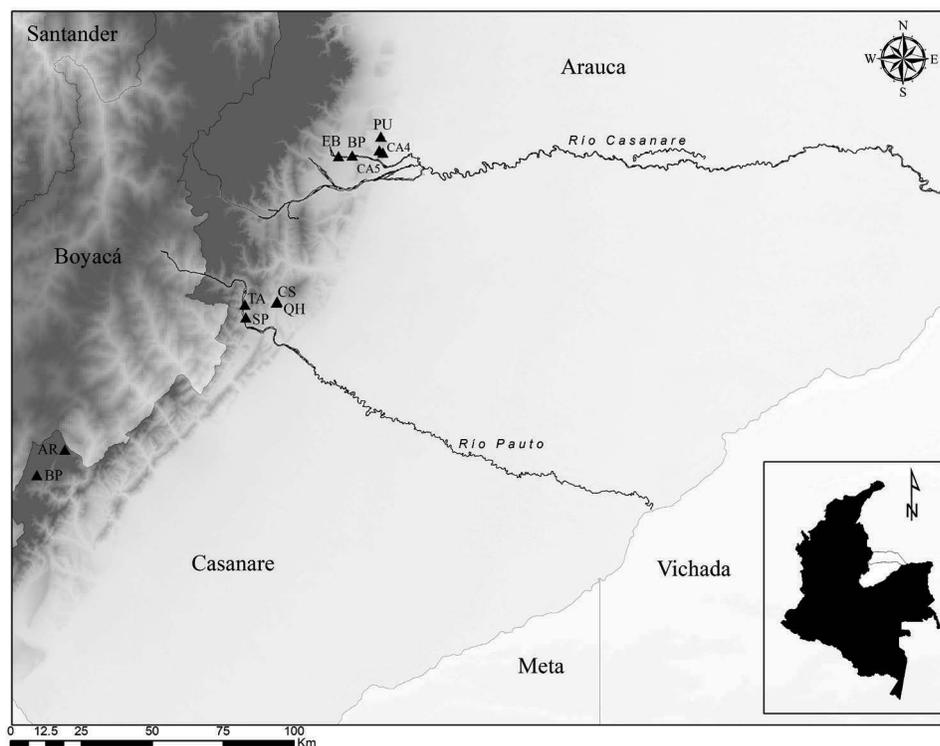


Figura 1. Área de estudio: bosques subandinos y de piedemonte de la vertiente orinoquense de la cordillera de los Andes, Colombia. BP= vereda Brisas del Tonce (Chámeza, Casanare); AR= vereda Los Alpes (Recetor, Casanare); SP= vereda San Pedro (Támara, Casanare); TA= vereda Tabloncito (Támara, Casanare); QH y CS= vereda Quebrada Honda (Támara, Casanare); CA4 y CA5= vereda Caribabare (Tame, Arauca); PU= vereda Puna Puna (Tame, Arauca); BP y EB = vereda El Banco Tame, Arauca).

Trabajo de campo

Empleando el método propuesto por [Gentry \(1982\)](#), se censaron, en 19 parcelas de 0.1 ha, todos los individuos con diámetro del tallo a la altura del pecho (DAP medido a 1.3 m desde la superficie del suelo) mayor o igual a 2.5 cm. Cada parcela de 0.1 ha estaba dividida en 10 subunidades (transectos) de 50 x 2 m paralelas entre sí y separadas al menos por 20 m. En cada cobertura se realizó el levantamiento florístico en los sitios indicados en la tabla 1. Las colecciones botánicas fueron determinadas taxonómicamente en el Herbario Nacional Colombiano (COL) del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia y depositadas en el Herbario Federico Medem del Instituto Humboldt (FMB),

con duplicados en COL y en Herbario Amazónico Colombiano (COAH). Los especímenes fueron colectados en el marco del permiso de investigación 500-41-15.07209 de Corporinoquia y del acuerdo 15-14-172-010CE emitido por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. La nomenclatura de las especies y familias sigue la empleada en la base de datos del Missouri Botanical Garden, la cual está de acuerdo con el sistema de clasificación APG IV ([2016](#)).

Tratamiento de datos

La diversidad alfa (α) se calculó como el número de especies por unidad de área; se computó la riqueza esperada según el estimador Chao1 ([Chao, 1984](#)) y se obtuvo la proporción de especies representada

en la muestra usando el software *StimateS* (Colwel, 2013). Se realizó un análisis de similitud florística entre sitios empleando el índice cuantitativo de Bray-Curtis (Bray & Curtis, 1957) con el método UPGMA. Para este análisis se usó el software Past 3.13 (Hammer *et al.*, 2001). Empleando una prueba de Mantel se evaluó la relación entre la similitud florística y la distancia geográfica entre sitios usando el lenguaje R (R Core Team, 2016). Usando la prueba no paramétrica de Mann-Whitney se evaluó si la riqueza obtenida en la vertiente orinoquense de los Andes era significativamente diferente a los resultados de estudios previos en las vertientes Amazónica, Pacífico y Magdalena que usaron la misma metodología de muestreo (gremio de árboles con DAP ≥ 2.5 en parcelas de 0.1 ha), principalmente los estudios compilados por Gentry (1995; 1988). También se usó una prueba de Mann-Whitney para evaluar la diferencia en la riqueza de bosques de piedemonte y subandinos del área de estudio.

RESULTADOS

Composición

Se registraron un total de 4903 individuos pertenecientes a 477 especies, distribuidas en 178

géneros y 72 familias. El 44 % de los taxones fueron determinados hasta especie, 39 % hasta género, 13.8 % hasta familia y el 3.2 % indeterminados. En el piedemonte, Fabaceae fue la familia con mayor riqueza genérica y específica, mientras que en el bosque subandino fue Lauraceae por su riqueza específica y Rubiaceae por su riqueza genérica (tabla 2). Moraceae se encontró entre las cinco familias más diversas en piedemonte, pero no en bosque subandino, mientras que Meliaceae resultó ser diversa en bosque subandino pero no en piedemonte. Melastomataceae, Rubiaceae y Euphorbiaceae resultaron ser elementos florísticos de importancia en ambos hábitats naturales (tabla 2). En cuanto a la composición y riqueza a nivel de género se encontró que *Inga* (Fabaceae) y *Miconia* (Melastomataceae) fueron los taxones mejor representados en el piedemonte, con 12 especies cada uno (3.5 % del total), mientras que en el bosque subandino *Miconia*, con 10 especies (3.47 %), resultó ser el género mejor representado, seguido por *Ocotea* (Lauraceae) y *Trichilia* (Meliaceae) con ocho especies cada uno (4.82 %; tabla 3). *Miconia* e *Inga* registraron alta diversidad tanto en piedemonte como en bosque subandinos; sin embargo, *Ficus* (Moraceae), *Sapium* (Euphorbiaceae) y *Annona* (Annonaceae) lo fueron únicamente para piedemonte y *Ocotea* (Lauraceae), *Trichilia* (Lauraceae)

Tabla 2. Familias más diversas en bosques subandinos y de piedemonte de la vertiente orinoquense de la Cordillera Oriental de los Andes en Colombia

Hábitat natural	Familia	No. géneros	% géneros	No. especies	% especies
Piedemonte	Fabaceae	16	10.32	40	11.561
	Euphorbiaceae	7	4.52	21	6.069
	Moraceae	7	4.52	21	6.069
	Melastomataceae	6	3.87	19	5.491
	Rubiaceae	14	9.03	18	5.202
Bosque subandino	Lauraceae	6	8.96	23	13.86
	Melastomataceae	6	8.96	15	9.04
	Rubiaceae	8	11.94	11	6.63
	Euphorbiaceae	5	7.46	9	5.42
	Meliaceae	2	2.99	9	5.42

y *Nectandra* (Lauraceae) para bosque subandino (tabla 3).

De las cuatro especies más abundantes registradas en todo el muestreo *Rudgea crassiloba* (Benth.) B.L. Rob. (Rubiaceae) y *Siparuna guianensis* Aubl. (Siparunaceae) se encontraron en las localidades de piedemonte (Támara y Tame), mientras que *Socratea exorrhiza* (Mart.) H. Wendl. (Arecaceae) y *Oenocarpus minor* Mart. (Arecaceae) se registraron únicamente en la localidad de Tame, pero ninguna de estas en las localidades de bosque subandino (Chámeza y Recetor). *R. crassiloba* y *S. guianensis* fueron especies generalistas que dominaron los estratos medios del bosque, con alturas no mayores a los 13 metros, tolerando diferentes tipos de ambiente pero que posiblemente encuentran sus condiciones óptimas de hábitat en bosques secundarios o con intervención antrópica media a alta como los bosques de las veredas Quebrada Honda (CS) y Caribabare (CA). De manera contrastante, *Ardisia foetida* Willd. ex Roem. & Schult. fue hallada casi exclusivamente en bosques ribereños de Quebrada Honda en Támara, alcanzando altas abundancias únicamente en esta cobertura.

Garcinia madroño (Kunth) Hammel, la quinta especie con mayor abundancia de todo el

muestreo se registró en los bosques subandinos y de piedemonte estudiados, resultando ser la especie más generalista. Estas cinco especies constituyen taxones de importancia para la estructura de las comunidades estudiadas. Entre las especies generalistas se encuentra también *Alchornea glandulosa* Poepp., un taxón que alcanzó alturas de hasta 33 m y que fue registrada tanto en bosques subandinos como en bosques de piedemonte, pero con valores de abundancia mucho más altos en bosques subandinos. Esta especie resultó ser un elemento florístico importante, pues hace parte del grupo de especies que componen el dosel y el estrato emergente de la mayoría de bosques estudiados.

Riqueza

La representatividad del muestreo por parcela varió entre 55-90 %, según el estimador Chao1 (tabla 4), mientras que el cálculo de completitud para todo el muestreo (19 parcelas), mostró valores de 81.4 % y 82.2 %, según los estimadores Chao1 y ACE respectivamente. La riqueza de especies observada por unidad de muestreo arrojó valores entre 47-84 especies (tabla 4, figura 3). Los bosques subandinos

Tabla 3. Géneros más diversos en bosques subandinos y de piedemonte de la vertiente orinoquense de la Cordillera Oriental de los Andes de Colombia.

Hábitat natural	Género	No. especies	% especies	No. individuos	% individuos
Piedemonte	<i>Inga</i>	12	3.47	67	1.76
	<i>Miconia</i>	12	3.47	103	2.71
	<i>Ficus</i>	9	2.60	25	0.66
	<i>Sapium</i>	7	2.02	28	0.74
	<i>Annona</i>	6	1.73	26	0.68
Bosque subandino	<i>Miconia</i>	10	6.02	86	7.80
	<i>Ocotea</i>	8	4.82	83	7.52
	<i>Trichilia</i>	8	4.82	12	1.09
	<i>Inga</i>	6	3.61	14	1.27
	<i>Nectandra</i>	5	3.01	20	1.81

registraron valores de riqueza mayores que los bosques de piedemonte, aunque la diferencia no fue significativa ($p=0.340$), con un promedio de 61 taxones ($n=4$) y un valor máximo de 84 especies (BT-11); mientras que en bosques de piedemonte la riqueza alcanzó un promedio de 58.9 especies ($n=14$) por unidad de área y un valor máximo de 80 especies en bosque ribereño (SP-2; [tabla 4](#)).

A nivel de géneros, la riqueza por unidad de muestreo en bosques de piedemonte fue mayor que en bosques subandinos, con un registro máximo de 50 taxones en bosque de tierra firme (EB-19) y un promedio de 41.1 géneros ($n=14$), mientras que en el bosque subandino se registró un valor máximo de 48 géneros (BT-11) y un promedio de 38.5 taxones ($n=4$) ([tabla 4](#)). A nivel de familias la riqueza por unidad de área fue mayor en bosques subandinos que en bosques de piedemonte ([tabla 4](#)). Los valores más bajos de riqueza a nivel de especies se registraron en bosques de tierra firme de piedemonte (PU-6) con 47 taxones,

mientras que a nivel de género y familia el bosque subandino (AR-10) y el bosque ribereño de piedemonte (QH-13) con 32 y 25 taxones respectivamente, fueron los de menor riqueza.

Recambio de especies

Los bosques estudiados conformaron dos grupos claramente diferenciados ([figura 2](#)): 1) bosques subandinos con una similitud florística del 25 % y; 2) bosques de piedemonte, con valores de 21–41 % de similitud entre las localidades de Tame. En los bosques subandinos se encontró una composición florística con predominio de elementos típicos de este hábitat natural, muchos de los cuales fueron exclusivos, estando ausentes en los bosques de piedemonte (Tamara y Tame). Ejemplos de estos elementos son *Aniba panurensis* (Meisn.) Mez, *Billia rosea* (Planch. & Linden) C. Ulloa & P. Jørg., *Chrysochlamys weberbaueri* Engl., *Cybianthus poeppigii* Mez, *Helicostylis tovarensis* (Klotzsch

Tabla 4. Riqueza florística por parcelas de 0.1 ha y representatividad de muestreo en bosques subandinos y de piedemonte de la vertiente orinoquense de la Cordillera Oriental de los Andes de Colombia.

Hábitat natural	Parcela	Altitud	No. familias	No. géneros	No. especies	No. individuos	Chao-1	% Repres.
Bosque subandino	AR-10	1913	25	32	51	223	72	70.83
	AR-12	1913	26	35	64	362	101.8	62.87
	BT-11	1490	29	48	84	269	108.8	77.21
	BT-9	1490	32	39	65	249	79.44	81.82
Piedemonte	BP-17	390	32	50	65	258	98.21	66.18
	BP-7	390	31	43	50	197	68.07	73.45
	CA-4	290	29	42	55	207	64	85.94
	CA-5	305	31	41	50	194	58.5	85.47
	CS-14	556	27	39	58	420	67.71	85.66
	EB-18	450	29	45	58	193	81.08	71.53
	EB-19	450	32	50	69	187	136.4	50.59
	PU-20	305	27	42	58	257	75.27	77.06
	PU-6	305	30	41	47	311	54.33	86.51
	QH-13	460	25	35	48	252	65.77	72.98
	QH-15	460	29	47	66	266	72.84	90.61
	SP-2	550	36	54	80	234	143.1	55.90
	SP-3	550	23	41	53	203	67.25	78.81
	TA-1	546	30	43	61	308	97.14	62.80
	TA-16	546	31	49	65	313	90.09	72.15

& H. Karst.) C.C., *Meriania haemantha* (Planch. & Lindl.) Humberto Mend. & Fern. Alonso, *Nectandra* cf. *purpurea* (Ruiz & Pav.) Mez, *Nectandra* cf. *reticulata* (Ruiz & Pav.) Mez, *Siparuna thecaphora* (Poepp. & Endl.) A. DC., *Wettinia praemorsa* (Willd.) Wess. Boer, *Joosia umbellifera* H. Karst., *Arachnothryx glabrata* (Standl.) Steyerem. y *Miconia dolichorrhyncha* Naudin, entre otras. Entre las especies compartidas con bosques de piedemonte se encuentran *M. dolichorrhyncha*, *Miconia trinervia* (Sw.) D. Don ex Loudon, *Piper arboreum* Aubl., *Chrysophyllum argenteum* Jacq., *Henriettella tuberculosa* (Donn. Sm.) L.O. Williams e *Inga sapindoides* Willd., entre otras las más abundantes.

En el piedemonte, la similitud florística en los bosques estudiados de Tame se debe a la presencia compartida de las siguientes especies en los bosques de las veredas El Banco (EB y BP) y Puna-Puna (PU), que se destacan por su alta abundancia: *S. exorrhiza*, *O. minor*, *S. guianensis*, *Tapirira guianensis* Aubl., *Garcinia madruno* (Kunth) Hammel, *R. crassiloba* (Benth.) B.L.Rob., *Annona edulis* (Triana

& Planch.) H. Rainer, *Hieronyma alchorneoides* Allemão, *Protium calanense* Cuatrec. y *Schefflera morototoni* (Aubl.) Maguire, Steyerem. & Frodin. Por otro lado, en Támara la similitud florística entre bosques de las veredas El Tabloncito (TA) y San Pedro (SP), pese a que son tipos de bosques distintos, resultaron compartir un buen número de taxones destacados por su alta abundancia: *S. guianensis*, *Myrcia fallax* (Rich.) DC., *Nectandra cuspidata* Nees & Mart., *Myrcia silvatica* Barb. Rodr., *Maprounea guianensis* Aubl., *Dimerocostus strobilaceus* Kuntze, *Miconia elata* (Sw.) DC. y *Guarea glabra* Vahl. Así mismo, entre las especies más abundantes compartidas entre las localidades de Tame y Támara se encuentran: *A. glandulosa*, *S. guianensis*, *T. guianensis*, *A. edulis*, *S. morototoni*, *Cecropia ficifolia* Warb. ex Snethl., *P. calanense* y *Miconia prasina* (Sw.) DC. Por otro lado, se encontró que la matriz de similitud florística entre bosques estuvo significativamente correlacionada con la matriz de distancias geográficas (prueba de Mantel: $P < 0.0034$, $R = -0.65$, figura 4).

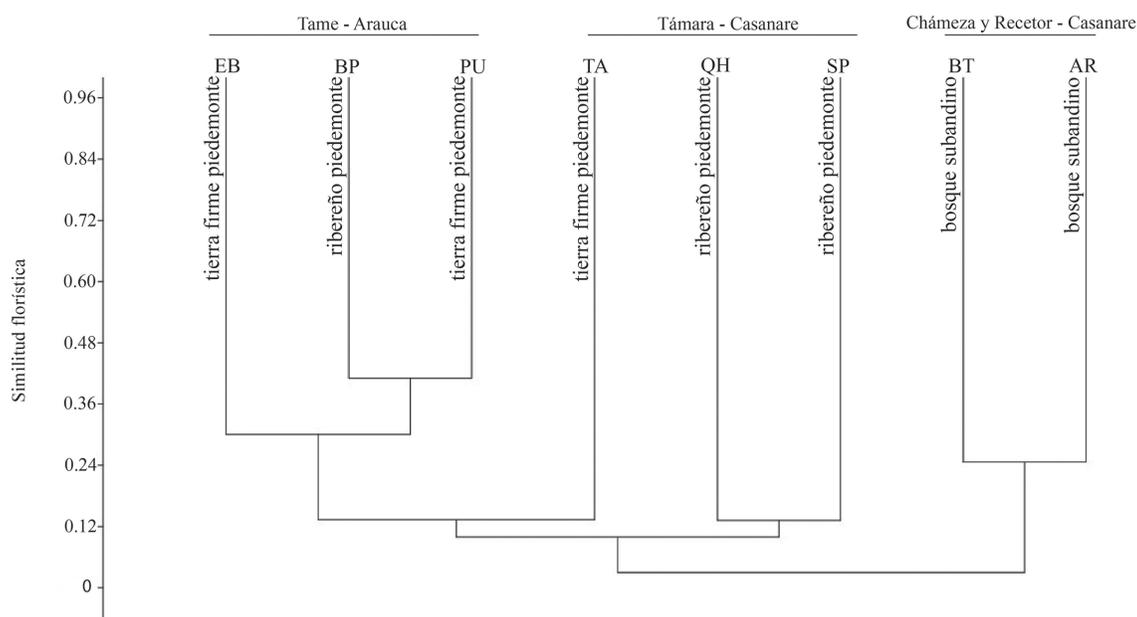


Figura 2. Dendrograma de similitud florística entre bosques subandinos y de piedemonte de la vertiente orinoquense de la Cordillera Oriental de los Andes en Colombia, considerando datos de abundancia (índice de Bray-Curtis).

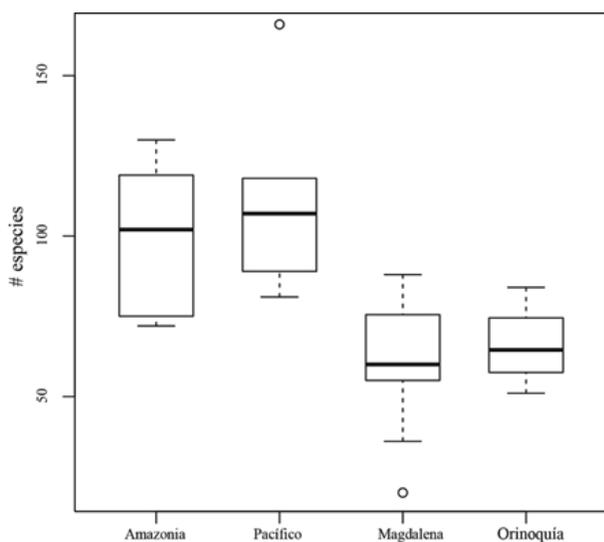


Figura 3. Comparación de la riqueza florística por unidad de área (0.1 ha) de árboles con DAP \geq 2.5 cm de bosques subandinos (1000 - 2400 m de altitud) de la vertiente Orinoquía (n=4), Magdalena (n=20) y Amazonia (n= 7) de la Cordillera Oriental con la vertiente Pacífico (n=5) de la Cordillera Occidental. Información de localidades, países y fuente de los datos se presentan en la Tabla 5.

DISCUSIÓN

Composición

La composición florística a nivel de familia se ajusta a lo reportado previamente para la Orinoquía colombiana y el neotrópico por franja altitudinal (Gentry, 1988; 1995), siendo la familia Fabaceae la más diversa en bosques de piedemonte por debajo de los 1000 m de altitud y Lauraceae en bosques subandinos entre 1500 y 2000 m de altitud (Córdoba *et al.*, 2011; Bernal *et al.*, 2015; Minorta & Rangel, 2015; tabla 2). Otros estudios coinciden con este resultado, en el que la familia Lauraceae reemplaza a Fabaceae como el taxón con mayor número de especies en elevaciones intermedias a altas (Galindo-T. *et al.*, 2003; Reynel & Antón, 2004; Marcelo-Peña & Reynel, 2014); previamente Gentry (1988; 1995) había encontrado que la cota de 1500 m de altitud en bosques montanos

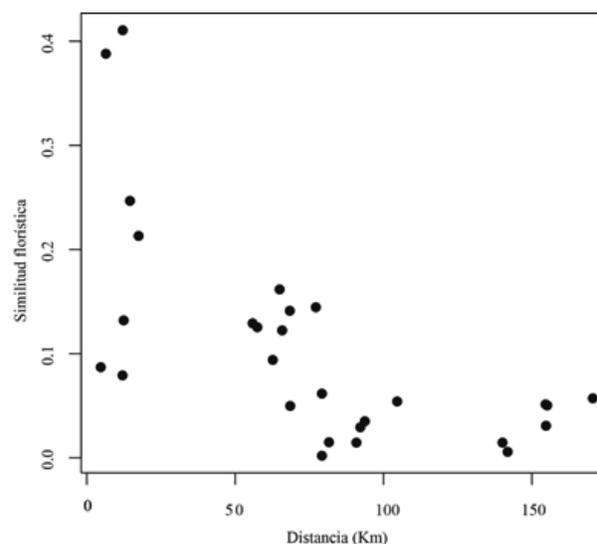


Figura 4. Gráfico de dispersión mostrando la relación entre similitud florística y la distancia geográfica (km) entre muestras (0.2 ha) de bosques subandinos y de piedemonte de la vertiente orinoquense de la Cordillera Oriental de los Andes en Colombia.

representa el límite de presencia de muchos géneros y familias botánicas, lo que está de acuerdo con los resultados de este estudio. Tres de las cinco familias más representadas en el piedemonte son compartidas con los bosques subandinos (tabla 2), indicando una escasa variación en la composición a este nivel taxonómico, tal como fue sugerido por Gentry (1988), quien encontró que, al menos en tierras bajas del neotrópico, solo 11 familias contribuyen en cerca de la mitad de la riqueza de especies en muestras de 0.1 ha.

De los tres géneros más representados en los sitios de estudio, *Miconia* e *Inga* han sido reportados en trabajos previos como los taxones con mayor número de especies tanto en los departamentos de Casanare y Arauca como en otros bosques neotropicales (Gentry, 1995; Córdoba *et al.*, 2011; Bernal *et al.*, 2015), así mismo, Gentry (1995) encontró a *Miconia* como el género más diversificado en los bosques andinos del neotrópico. Respecto a la composición a nivel de especie, estudios previos en el piedemonte llanero de los departamentos de

Meta y Casanare (Viña, 1995; Alvira, 1997; Pérez, 2005; Aldana, 2015), confirman la alta importancia ecológica de *S. guianensis* en el estrato subarbóreo y *G. madroño* y *A. glandulosa* en el estrato arbóreo. En relación a la importancia de palmas en los bosques de piedemonte en Tame (Arauca), es importante destacar que son elementos florísticos relevantes por su abundancia, más que por su

diversidad; su presencia destacó en bosques primarios donde al menos tres especies (*S. exorrhiza*, *O. minor* y *Attalea butyraceae* (Mutis ex L. f.) Wess. Boer) presentaron altas abundancias por unidad de área, confirmando que las especies de palmas constituyen un componente estructural y funcional conspicuo en los bosques neotropicales (Terborgh & Andresen, 1998; Gentry, 1988).

Tabla 5. Riqueza de árboles con DAP \geq 2.5 cm por parcelas de 0.1 ha en bosques subandinos neotropicales (950–2400 m de altitud) de las vertientes Amazonía, Pacífico y Magdalena.

Vertiente	Localidad	N.º especies	Altitud (m)	Fuente
Amazonía	Bolivia, Incahuara, La Paz	130	1540	Gentry, 1988
Amazonía	Perú, Venceremos, Amazonas	129	1850	Gentry, 1988
Amazonía	Ecuador, Huamani, Napo	102	1150	Gentry, 1988
Amazonía	Perú, La Genoa, Junin	77	1160	Gentry, 1988
Amazonía	Perú, Chirinos, Cajamarca	73	1750	Gentry, 1988
Amazonía	Bolivia, Sacramento, La Paz	72	2450	Gentry, 1988
Amazonía	Campucana, Mocoa, Putumayo	109	1400	Franco et al., 1997
Pacífico	Colombia, Murri, Antioquia	118	1000	Gentry, 1995
Pacífico	Colombia, Antado, Antioquia	108	1560	Gentry, 1995
Pacífico	Colombia, Alto de Cuevas, Antioquia	81	1710	Gentry, 1995
Pacífico	Colombia, La Planada, Nariño	89	1800	Gentry, 1995
Pacífico	Colombia, Farallones de Cali, Valle	106	1950	Gentry, 1995
Pacífico	Colombia, Barbachoas, Nariño	166	1350	Franco et al., 1997
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	42	2424	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	76	2223	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	81	2204	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	55	2174	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	68	2171	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	69	2135	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	75	2001	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	55	1921	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	47	1919	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	60	1917	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	76	1912	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	76	1908	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	58	1896	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	55	1884	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	69	1789	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	57	1765	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	36	2059	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, PNN C. Guacharos, Huila	20	1905	Prada & Stevenson, 2016
Magdalena	Colombia, Finca Meerenberg, Huila	88	2290	Gentry, 1995
Orinoquía	Colombia, Chámeza, Casanare	65	1490	Este estudio
Orinoquía	Colombia, Chámeza, Casanare	84	1490	Este estudio
Orinoquía	Colombia, Recetor, Casanare	51	1913	Este estudio
Orinoquía	Colombia, Recetor, Casanare	64	1913	Este estudio

Riqueza

De acuerdo con Villarreal *et al.* (2006), los muestreos que obtienen una representatividad mayor al 85 % pueden ser usados para hacer análisis de similitud y complementariedad; los valores obtenidos en este estudio (81.4 % y 82.2 %) se acercan al valor sugerido, sin embargo un mayor número de parcelas sería requerido para mejorar la completitud, principalmente en bosques subandinos donde el área de muestreo fue de 0.4 ha, mientras en bosques ribereños y de tierra firme de piedemonte fue de 0.8 y 0.7 respectivamente.

La riqueza florística encontrada en los bosques subandinos en parcelas de 0.1 ha (950–2400 m de altitud) de la vertiente orinoquense de los Andes (rango: 51–84, promedio: 66, figura 3) fue significativamente menor ($P = 0.0317$) a la registrada en estudios previos de la vertientes Pacífico (rango: 81–118, promedio: 100) y amazónica (rango: 72–130, promedio: 97; $P = 0.066$), sin embargo no mostró diferencias significativas con la vertiente Magdalena (rango: 20–88, promedio: 60.95; $P = 0.776$; figura 3 y tabla 5).

Respecto a la riqueza florística encontrada en el piedemonte orinoquense (tabla 4), otros estudios en el piedemonte llanero han reportado valores de riqueza entre 82-91 especies (Viña, 1995; Alvirra, 1997; Pérez, 2005), que aunque son levemente mayores, se encuentran muy cercanos al rango de riqueza reportado en este estudio (rango: 47-80, promedio: 58, $n=15$; tabla 4). En otras regiones biogeográficas como, por ejemplo, el piedemonte amazónico de Ecuador y Perú (Gentry 1988; 1995) los valores de riqueza (rango: 97-184, promedio: 156 spp, $n=6$) resultaron significativamente mayores a los encontrados en este estudio ($P=0.00103$). Lo que apoya las afirmaciones de Minorta & Rangel (2015), quienes registran una baja riqueza de especies de plantas con flores en la región de la Orinoquía, respecto a otras regiones como Amazonia y Chocó. Los resultados sugieren que los factores abióticos e históricos que definen la riqueza de árboles en tierras bajas como, por ejemplo,

la precipitación que explica la alta riqueza en el Chocó (Gentry, 1988), son determinantes en la riqueza de los Andes, pues sus respectivas vertientes registraron los valores de riqueza más altos comparados con las vertientes de Orinoquía y Magdalena, donde la riqueza de tierras bajas es menor (Minorta & Rangel, 2015). Para la cordillera de los Andes, se ha reportado que los patrones de precipitación están influenciados por el océano Atlántico, el océano Pacífico y la cuenca amazónica y que existen diferencias climáticas marcadas entre la vertiente oriental y occidental y entre diferentes flancos de los valles interandinos (Velez *et al.*, 2000). Aunque se requieren estudios adicionales para evaluarlo, estas diferencias climáticas podrían ser determinantes en la riqueza florística de la región andina.

En relación con la riqueza a través del gradiente de elevación, la diferencia entre el piedemonte y los bosques subandinos no resultó significativa ($p=0.340$). Sin embargo, el bajo número de parcelas en elevaciones intermedias y altas señalan la necesidad de ampliar el esfuerzo de muestreo para hacer afirmaciones confiables, que permitan aportar al entendimiento de los modelos de variación en el número de especies a lo largo del gradiente altitudinal. Por otro lado, respecto a la riqueza comparativa entre tipos de bosque, otros estudios han sugerido que los bosques de tierra firme son más diversos que los bosques inundables (Ter Steege *et al.*, 2000; Cano & Stevenson, 2009). Dichos resultados no son compartidos con este estudio ya que la diferencia de riqueza entre parcelas de piedemonte y montaña en diferentes tipos de bosque no fue representativa ni consistente entre sitios (tabla 4).

Recambio de especies

Los resultados obtenidos indican que las comunidades espacialmente cercanas tienden a presentar mayor similitud florística entre sí que con bosques del mismo tipo en zonas alejadas. La distancia entre parcelas explica el 65 % de la composición

florística (prueba de Mantel: $P < 0.01$, $R = -0.65$), un porcentaje de correlación alto respecto al de otros estudios que encontraron correlación significativa, donde los valores de la correlación se encuentran entre 0.11-0.67. (Terborgh & Andresen, 1998; Condit *et al.*, 2002; Duivenvoorden *et al.*, 2002; Duque *et al.*, 2002; Vormisto *et al.*, 2004; Castro & Jaksic, 2008; López & Duque, 2010; Zamborlini *et al.*, 2016). Lo anterior sugiere que la distancia geográfica es un buen predictor de la similitud florística y que las limitaciones de dispersión son un importante mecanismo para explicar el recambio florístico en bosques subandinos y de piedemonte en la Orinoquía colombiana.

El análisis de similitud florística mostró que los bosques ribereños de Tame y Támara en Casanare no son florísticamente similares (figura 2). Lo cual sugiere que, en la escala de análisis de este estudio, el régimen de inundación no es un factor ambiental que determine la composición de especies de árboles, favoreciendo evidencia a favor de los procesos estocásticos como controladores del recambio florístico en el área de estudio. Sin embargo, es probable que el esfuerzo de muestreo no sea suficiente para soportar el patrón observado; se requerirá un mayor número de parcelas para hacer afirmaciones confiables acerca de la importancia relativa del régimen de inundación en la diversidad beta de bosques de piedemonte. Estudios futuros deberían complementar el muestreo y emplear métodos numéricos adicionales como, por ejemplo, los propuestos por Legendre *et al.* (2005) para evaluar la partición de la varianza en componentes independientes: espacial, ambiental, combinado y residual. Así mismo, se deberían incluir variables funcionales, dado que un amplio número de publicaciones sugiere que la diversidad funcional, en lugar de la diversidad de especies, mejora el funcionamiento de los ecosistemas (Loiseau *et al.*, 2017). Adicionalmente, para futuras investigaciones se sugiere que los bosques ribereños sean segregados en diques de ribera y planos de inundación como unidades distintas para evaluar su efecto en los resultados del análisis de diversidad

beta, dadas sus diferencias en los regímenes de inundación, que podrían generar variaciones en la composición florística y afectar la interpretación del análisis de similitud florística.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio mostraron que la riqueza florística en los bosques subandinos de la vertiente orinoquense fue significativamente más baja que la reportada por otros estudios en las vertientes de la Amazonia y el Pacífico. Sin embargo, fue similar a la registrada en la vertiente del Magdalena. Las diferencias climáticas y la influencia de la riqueza de tierras bajas adyacentes a cada vertiente son posibles explicaciones a estos resultados.

La distancia geográfica resultó ser un buen predictor de la similitud florística, lo que permite sugerir que las limitaciones de dispersión son un importante mecanismo para explicar el recambio florístico en bosques subandinos y de piedemonte en la Orinoquía colombiana. Mayor esfuerzo de muestreo y análisis numéricos más robustos serán necesarios para concluir acerca de la importancia relativa del régimen de inundación como variable explicativa del recambio florístico.

Finalmente, se encontró que la composición florística no presentó ningún patrón diferente al previamente reportado para la Orinoquía y el neotrópico; además, coincide con los reportes de estudios previos para el área de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue desarrollada en el marco de los proyectos “Conservación de especies amenazadas en el área de influencia del oleoducto Bicentenario”, convenio de cooperación n.º 15-14-172-010CE entre el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y la Fundación Reserva Natural La Palmita, Centro de Investigación; y “Caracterización de humedales,

riqueza de ecosistemas de piedemonte y montaña, identificación de incentivos socioeconómicos para la conservación y servicios ecosistémicos asociados a adaptación de cambio climático en el departamento de Casanare", contrato de consultoría .n.º 1918 de 2014 entre la Gobernación del Casanare y el consorcio Casanare Biodiversa.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldana, A.M.** (2005). Patrones de regeneración y diversidad florística en fragmentos de bosque con intervención antrópica en el piedemonte llanero, Colombia (Trabajo de pregrado de Biología). Bogotá: Universidad de los Andes. 90 p.
- Alvira, D.** (1997). Estructura y composición florística de cuatro estadios sucesionales de bosque húmedo tropical en el piedemonte llanero (Trabajo de pregrado, Biología). Bogotá: Universidad de los Andes. 48 p.
- Angiosperm Phylogeny Group APG IV.** (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181, 1-20.
- Bell, G.** (2001). Neutral macroecology. *Science*, 293, 2413-2418. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.293.5539.2413>
- Bernal, R., Gradstein, S.R., & Celis, M.** (eds.). (2015). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. 1504 p.
- Bray, J.R., & Curtis, J.T.** (1957). An ordination of upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27, 325-349. DOI: <https://doi.org/10.2307/1942268>
- Calderón, J. M., Moreno, C.E., & Zuria, I.** (2012). La diversidad beta: medio siglo de avances. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83(3), 879-891. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.25510>
- Cano, A., & Stevenson, P.** (2009). Diversidad y composición florística de tres tipos de bosque en la estación biológica Caparú, Vaupés. *Colombia Forestal*, 12, 63-80. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2009.1.a06>
- Castro, S., & Jaksic, F.** (2008). Patterns of turnover and floristic similarity show a non-random distribution of naturalized flora in Chile, South America. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81, 11-121. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2008000100009>
- Chao, A.** (1984). Nonparametric estimation of the number of classes in a population. *Scandinavian Journal of statistics*, 11, 265-270.
- Colwel, R.K.** (2013). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Versión 9. Recuperado de: purl.oclc.org/estimates
- Condit, R., Pitman, N., Leigh, E.G., Chave, J., Terborgh, J., Foster R.B., Nuñez, V.P., Aguilar, S., Valencia, R., Villa, G., Muller-Landau, H.C., Losos, E., & Hubbell, S.P.** (2002). Beta diversity in tropical forest trees. *Science*, 295, 666-669. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1066854>
- Córdoba, M., Miranda, L., Avila, R., & Pérez, C.** (2011). Flora de Casanare. En J.S. Usma & F. Trujillo (eds.) *Biodiversidad del Casanare: ecosistemas estratégicos del departamento* (pp. 82-101). Bogotá: Gobernación de Casanare-WWF Colombia.
- Cornell, H.V., & Lawton, J.H.** (1992). Species interactions, local and regional processes, and limits to the richness of ecological communities: a theoretical perspective. *Journal of Animal Ecology*, 61, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.2307/5503>

- Duivenvoorden, J.F., Svenning, J.C., & Wright, S.J.** (2002). Beta diversity in tropical forests. *Science*, 295, 636-637.
- Duque, A., Sánchez, M., Cavelier, J., & Duivenvoorden, J.F.** (2002). Different floristic patterns of woody understorey and canopy plants in Colombian Amazonia. *Journal of Tropical Ecology*, 18, 499-525. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467402002341>
- Ferreira, C.S., Piedade, M.T., Franco, A.C., Gonçalves, J.F., & Junk, W.J.** (2009). Adaptive strategies to tolerate prolonged flooding in seedlings of floodplain and upland populations of *Himatanthus sucuuba*, a Central Amazon tree. *Aquatic Botany*, 90, 246-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.10.006>
- Franco, P., Bentacur, J., & Alonso, J.L.** (1997). Diversidad florística en dos bosques subandinos del sur de Colombia. *Caldasia*, 19(1-2), 205-234.
- Galindo-T., R., Betancur, J., & Cadena-M., J.J.** (2003). Estructura y composición florística de cuatro bosques andinos del santuario de flora y fauna Guanentá-alto río Fonce, cordillera Oriental colombiana. *Caldasia*, 25(2), 313-335.
- Garavito, J., Suárez, C., Bravo, A., Vargas, R., Cuadros, L., Córdoba, M., Miranda, L., Martínez, J., & Usma, J.** (2011). Descripción del medio natural del departamento del Casanare. En J.S. Usma & F. Trujillo (eds) *Biodiversidad del Casanare: ecosistemas estratégicos del departamento* (pp. 50-71). Bogotá: Gobernación de Casanare-WWF Colombia.
- Garsen, A.G., Baatrup-Pedersen, A., Voeselek, L.A., Verhoeven, J.T., & Soons, M.B.** (2015). Riparian plant community responses to increased flooding: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 21, 2881-2890. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12921>
- Gentry, A.H.** (1982). Patterns of neotropical plant diversity. *Evolutionary Biology*, 15, 1-84.
- Gentry, A.H.** (1988). Tree species richness of upper Amazonian forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 85, 156-159. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.85.1.156>
- Gentry, A.H.** (1995). Patterns of diversity and floristic composition in neotropical montane forest. En S.P. Churchill, H. Balslev, E. Forero & J.L. Luteyn (eds.) *Biodiversity and conservation of neotropical montane forests* (pp. 103-126). New York: The New York Botanical Garden.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., & Ryan, P.D.** (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1-9.
- Hubbell, S.P., Foster R.B., O'Brien, S.T., Harms, K.E., Condit, R., Wechsler, B., Wright, S.J., & Loo de Lao S.** (1999). Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. *Science*, 283, 554-557.
- Hutchinson, G.E.** (1957) Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-427. DOI: <https://doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac).** (1999). Casanare, características geográficas. Bogotá: Gobernación de Casanare, Corporinoquía, Organización de los Estados Iberoamericanos, BP Exploration Company, Ecopetrol, Triton Colombia y Total Exploration Exprodukh Maatchappisbu. 180 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Igac).** (2014). Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Casanare, escala 1:100 000. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Kessler, M., Grytnes, J.A., Halloy, S.R., Kluge, J., Krömer, T., León, B., & Young, K.R.** (2011). Gradients of plant diversity: local patterns and processes. En S.K. Herzog, R. Martínez, P.M. Jørgensen & H. Tieszen (eds.) *Climate change and biodiversity in the tropical Andes* (pp. 204-219). São José dos Campos y París: Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente.
- Legendre, P., Borcard, D., & Peres-Neto, P.** (2005). Analyzing beta diversity: Partitioning the spatial variation of community composition data. *Ecological Monographs*, 75, 435-450. DOI: <https://doi.org/10.1890/05-0549>
- Loiseau, N., Legras, G., Gaertner, J., Verley, P., Chabanet, P., & Mérigot, B.** (2017). Performance of partitioning functional beta-diversity indices:

- Influence of functional representation and partitioning methods. *Global Ecology and Biogeography*, 26, 753-762.
- López, W., & Duque, A.J.** (2010). Tasas de recambio florístico de géneros en bosques montanos del neotrópico. *Caldasia*, 32(1), 175-189.
- Marcelo-Peña, J.L., & Reynel, C.** (2014). Patrones de diversidad y composición florística de parcelas de evaluación permanente en la selva central de Perú. *Rodriguesia*, 65(1), 35-47. DOI: <https://doi.org/10.1590/S2175-78602014000100003>
- Minorta, V., & Rangel, O.** (2015). La riqueza y la diversidad de las plantas con flores de la Orinoquia colombiana. En O. Rangel (ed.) *Colombia Diversidad Biótica XIV La región de la Orinoquia de Colombia* (pp. 237-418). Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Naiman, R.J., & Decamps, H.** (1997). The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28(1), 621-658. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
- Normand, S., Vormisto, J., Svenning, J.C., Grandez, C., & Balslev, H.** (2006). Geographical and environmental controls of palm beta diversity in paleo-riverine terrace forests in Amazonian Peru. *Plant Ecology*, 186, 161-176. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9120-9>
- Pérez, C.** (2005). Análisis comparativo de la composición y estructura de la vegetación riparia de tres rangos altitudinales, en un fragmento de bosque de piedemonte de la reserva forestal protectora cuenca alta del caño Vanguardia y quebrada Vanguardiano (RFPVV), Villavicencio-Meta. (Trabajo de pregrado, Ecología). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. 110 p.
- Phillips O.L., Vargas, P., Monteagudo, A., Cruz, A., Zans, M.E., Sánchez, W., Yli-Halla, M., & Rose, S.** (2003). Habitat association among Amazonian tree species: a landscape-scale approach. *Journal of Ecology*, 91, 757-775. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00815.x>
- Potts, M.D., Ashton, P.S., Kaufman, L.S., & Plotkin J.B.** (2002). Habitat patterns in tropical rain forests: a comparison of 105 plots in northwest Borneo. *Ecology*, 83(10), 2782-2797. DOI: [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2782:HPITRF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2782:HPITRF]2.0.CO;2)
- Prada, C.M., & Stevenson, P.R.** (2016). Plant composition associated with environmental gradients in tropical montane forests (Cueva de Los Guacharos National Park, Huila, Colombia). *Biotropica*, 48(5), 568-576. DOI: <https://doi.org/10.1111/btp.12331>
- Purcell, A.** (2016). Functional trait variation along a hydrological gradient and trait-based predictions of the composition of a wetland plant community (Trabajo de grado de Maestría, Ciencias Biológicas). Hamilton, New Zealand: The University of Waikato. 79 p.
- R Core Team.** (2016). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de: <https://www.R-project.org/>.
- Rangel-Ch., J.O., Aguilar, M., Sánchez, H., Lowy-C., P., Aguilar, M., & Castillo, A.** (1995). Región de la Orinoquia. En J.O. Rangel-Ch. (ed.) *Colombia diversidad biótica I* (pp. 239-254). Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia.
- Reynel-R., C., & Antón, D.** (2004). Diversidad y composición de la flora arbórea en un área ribereña de bosque montano: Pichita, Valle de Chanchamayo, 2000-2500 msnm. En D. Antón y C. Reynel (eds.) *Relictos de Bosques de Excepcional Diversidad en los Andes Centrales del Perú* (pp. 99-323). Lima: Herbario de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Rodríguez, N., Armenteras, D., Morales, M., & Romero, M.** (2004). *Ecosistemas de los Andes colombianos*. Bogotá: Instituto de Investigaciones Alexander von Humboldt. 155 p.
- Socolar, J.B., Gilroy, J.J., Kunin, W.E., & Edwards, D.P.** (2016). How should beta-diversity inform biodiversity conservation? *Trends in Ecology and Evolution*, 31(1), 67-80.
- Terborgh, J., & Andresen, E.** (1998). The composition of Amazonian forests: patterns at local and regional scales. *Journal of Tropical Ecology*, 14, 645-664. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467498000455>

- Ter Steege, H., Sabatier, D., Castellanos, H., van Andel, T., Duivenvoorden, J., De Oliveira, A.A., Ek, R., Lilwah, R., Maas, P., & Mori, S.** (2000). An analysis of the floristic composition and diversity of Amazonian forests including those of the Guiana Shield. *Journal of Tropical Ecology*, 16, 801-828. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0266467400001735>
- Tuomisto, H., Ruokolainen, K., & Yli-Halla, M.** (2003). Dispersal, environment, and floristic variation of western Amazonian forests. *Science*, 299, 241-244. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1078037>
- Vélez, J.I., Poveda G., & Mesa, O.J.** (2000). Balances hidrológicos de Colombia. *Serie del Posgrado en Recursos Hidráulicos*, 16.
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina M., & Umaña, A.** (2006). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 236 p.
- Viña, A.** (1995). Influencia de la fragmentación de bosques sobre la riqueza de especies de árboles en el piedemonte llanero (Trabajo de pregrado, Biología). Bogotá: Universidad de los Andes. 57 p.
- Vormisto, J., Svenning, J.C., Hall, P., & Balslev, H.** (2004). Diversity and dominance in palm (Areaceae) communities in terra firme forests in the western Amazon basin. *Journal of Ecology*, 92, 577-588.
- Whittaker, R.H.** (1956) Vegetation of the great Smoky Mountains. *Ecological Monographs*, 26, 1-80. DOI: <https://doi.org/10.2307/1943577>
- Wittmann, F., Householder, E., Piedade, M.T., Assis, R.L., Schöngart, J., & Parolin, P.** (2013). Habitat specificity, endemism and the neotropical distribution of Amazonian white-water floodplain trees. *Ecography*, 36, 690-707. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07723.x>
- Zamborlini, F., Brown, J.L., Thomas, W.W., de Oliveira-Filho, A.T., & Carnaval, A.C.** (2016). Environmental correlates of floristic regions and plant turnover in the Atlantic Forest hotspot. *Journal of Biogeography*, 43(12), 2322-2331. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.12774>



ECUACIONES DE VOLUMEN TOTAL Y DE RAZÓN PARA ESTIMAR EL VOLUMEN COMERCIAL DE *Swietenia macrophylla* King

Total volume and ratio equations to estimate the commercial volume of *Swietenia macrophylla* King

Jonathan Hernández-Ramos¹, Adrián Hernández-Ramos², Xavier García-Cuevas³,
Juan Carlos Tamarit-Urias⁴, Luis Martínez-Ángel⁵ & Jesús García-Magaña⁶

Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas, X., Tamarit-Urias, J.C., Martínez-Ángel, L., & García-Magaña, J. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34-46

Recepción: 15 de mayo de 2017

Aprobación: 28 de agosto de 2017

Resumen

La estimación del volumen es indispensable para el manejo forestal sustentable. En el trópico de México, la especie arbórea de mayor interés comercial es caoba (*Swietenia macrophylla* King). Por tanto, la actualización constante y uso de herramientas cuantitativas es fundamental en su óptimo aprovechamiento. El objetivo fue ajustar modelos de volumen total y generar un sistema de volumen comercial para *S. macrophylla* a partir de modelos de razón de volumen. Se utilizó información dasométrica de 116 árboles para ajustar dos modelos de volumen total y cinco de razón de volumen. Por los valores en los estadísticos y la significancia de parámetros, el modelo de volumen total de Spurr y los modelos de razón de volumen de Van Deusen y Zepeda fueron los mejores. Los sesgos y la diferencia agregada muestran que las estimaciones son precisas, por lo que los sistemas se pueden usar para estimar el volumen de manera confiable.

Palabras clave: aprovechamiento forestal, cubicación, productos maderables, tabla de volumen.

Abstract

Reliable estimates of volume are indispensable for sustainable forest management. In tropical Mexico, a tree species of major commercial interest is mahogany (*Swietenia macrophylla* King). Therefore, the use of up to date quantitative tools is fundamental in forest harvesting. The objective was to adjust a total volume model and to generate a commercial volume system for *S. macrophylla* from volume ratio models. Dasometric information from 116 trees was used to adjust two models of total volume and five of volume ratio. Considering statistics fitness and significance of their parameters, the Spurr total volume model and the volume ratio models of Van Deusen and Zepeda were selected as the best. Bias and aggregate difference show that estimates are accurate, so systems can be used reliably.

Key words: forest harvesting, cubication, timber products, volume table.

1 Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias (Inifap). Chetumal, Quintana Roo, México. Autor para correspondencia forestjonathanhdez@gmail.com.

2 Inifap. Saltillo, Coahuila, México. adrian.hernandezr90@gmail.com

3 Inifap. Chetumal, Quintana Roo, México. xavier_garciacuevas@yahoo.com.mx

4 Inifap. San Martinito, Puebla, México. tamarit.juan@inifap.gob.mx

5 Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza (ITSVIC). Puebla, México. luis_90chi@hotmail.com

6 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México. garma@umich.mx

INTRODUCCIÓN

En el año 2015, el estado de Quintana Roo ocupó el segundo lugar a nivel nacional (México) en aprovechamiento de especies tropicales de maderas preciosas con 4.689 m³rta (metros cúbicos rollo total árbol) y una de las especies de mayor importancia comercial maderable fue *S. macrophylla* (Semarnat-Conafor, 2014; Semarnat, 2015). Sin embargo, el conocimiento en décadas pasadas para el manejo de esta especie fue deficiente (Torres, 2004; Sedeqroo, 2005; Synnott, 2007), aun cuando está incluida en el listado Cites, en el apéndice II, como especie de aprovechamiento controlado (Cites, 2016) y es la especie guía en los aprovechamientos forestales de la región (Synnott, 2007). Esto ocasionó que no se cubriera la variabilidad de crecimiento en las prácticas silvícolas aplicadas (Chapela, 2012; Apodaca-Martínez et al., 2014) y que las existencias volumétricas por hectárea en el estado hayan disminuido (Albrecht et al., 2002; Negreros-Castillo & Martínez, 2011). Esta situación ha estado en proceso de cambio en años recientes al realizar esfuerzos que nos permiten conocer más a fondo la ecología de la especie (Negreros-Castillo & Mize, 2012; Negreros-Castillo et al., 2014) y disponer de técnicas cuantitativas, actualizadas y confiables que contribuyan a mejorar el manejo forestal de esta especie. Por ejemplo, la ejecución en el estado del Sistema Biométrico para la Planeación del Manejo Forestal Sustentable de los Ecosistemas con Potencial Maderable en México.

La estimación de las existencias volumétricas de rodales y bosques es esencial para planear, ejecutar y evaluar actividades propuestas en los programas de manejo forestal (Alder, 1980; Barrera et al., 1986; Prodan et al., 1997; Magaña et al., 2008). Sin embargo, este cálculo realizado a través de información de inventario forestal siempre ha causado la incertidumbre de su precisión (Ramos-Uvilla et al., 2014) por las diversas condiciones de crecimiento y el sin número de interacciones que tienen con otros individuos. Ambos generan factores

de forma en los individuos distintos y que dos árboles tengan el mismo volumen con dimensiones de diámetro normal y altura total diferentes (Velasco et al., 2006).

Los factores de forma y la descripción del perfil fustal de los árboles permiten cuantificar el volumen total, el volumen comercial (V_c) y la distribución de productos maderables por tipo de producto o por individuo, situación que contribuye a mejorar la planeación y ejecución de las actividades propuestas en un programa de manejo forestal y a valorar económicamente los aprovechamientos maderables de acuerdo a sus condiciones (Mora & Hernández, 2007), ya sea de un bosque natural (Uranga-Valencia et al., 2015; Rodríguez-Toro et al., 2016a; Rodríguez-Toro et al., 2016b) o de plantaciones forestales comerciales (PFC) (Tamarit et al., 2014; Hernández-Ramos et al., 2017).

El V_c se define como la proporción del volumen total en función del diámetro mínimo comercial (dm) (Torres & Magaña, 2001). Según Prodan et al. (1997), se puede estimar de tres formas: 1) funciones parciales de V_t con un diámetro o altura límite sin considerar el resto del árbol (volumen de fuste limpio [V_{fl}]) como lo refieren Sol-Sánchez et al. (2015) para *Avicennia germinans*; 2) funciones de perfil o ahusamiento estableciendo una altura o diámetro comercial mínimo para estimar el V_c , tal como lo realizaron Rodríguez-Toro et al. (2016b) para *Eucalyptus nitens*; y 3) modelos de razón volumétrica (r) correspondientes a la proporción entre el V_c y el V_t de acuerdo a un límite de altura dada como el caso que abordan Barrios et al. (2014) para *Eucalyptus grandis*.

Los modelos de razón volumétrica (r) utilizan el cociente del V_c y el V_t y han sido utilizadas con éxito por la precisión y simplicidad con que se generan (Trincado et al., 1997; Chauchard & Sbrancia, 2005; Gilabert & Paci, 2010; Barrios et al., 2014), debido a que al ajustar este tipo de modelos se minimizan los errores de estimación del volumen de forma directa y no del diámetro, o diámetro cuadrático de diferentes alturas, como lo hacen las funciones ahusamiento V_c (Prodan et al., 1997)

que posteriormente son empleadas para estimar el V_c a cualquier límite de utilización dado, haciendo que la estimación se realice de forma indirecta y se tenga el error de haber descrito el perfil fustal y no del V_c .

Debido a que la caoba es una especie guía en el manejo de los bosques tropicales en el estado (Synnott, 2007) y que es una especie incluida en el apéndice II del Cites, donde no se hace restrictivo su aprovechamiento y comercialización en México, se debe de asegurar su supervivencia y propiciar la regeneración (Cites, 2016). Además de la importancia que tiene contar con técnicas confiables para el manejo sostenible de los recursos en los bosques (FAO, 2017). Se planteó el objetivo de evaluar el ajuste estadístico de dos modelos de volumen total y cinco modelos de razón de volumen para generar un sistema de funciones que estimen el volumen comercial para *S. macrophylla* que crece en bosques naturales de la zona centro y sur del estado de Quintana Roo, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en el centro y sur del estado de Quintana Roo, México, en los ejidos Felipe Carrillo Puerto, Chan Santa Cruz, Naranjal Poniente, X-Hazil Sur y Anexos, San Felipe Bacalar y Caobas, además del sitio experimental San Felipe Bacalar del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap). Las topografías son de tipo lomeríos bajos (LBJ) y llanura rocosa (LRO). El clima es de tipo cálido subhúmedo (Aw) con una temperatura media anual mayor a 22°C y un régimen de lluvias en la estación de

verano con una precipitación media anual de alrededor de 1300 mm (García, 2004). Los suelos son de tipo Litosol y Rendzina y la altitud del área de estudio va de los 50 a los 200 m (Semarnat-Conafor, 2014).

La base de datos utilizada se conformó de una muestra representativa de 116 árboles que se distribuyeron en la zona de estudio para cubrir la variabilidad de formas, tamaños y crecimientos de la especie. En los árboles se midieron de forma directa los diámetros a 0.3, 0.6, 0.9, 1.3 y 2.5 m de altura sobre el fuste; posteriormente, con un tele-elascopeo de Biterlich, se registraron las dimensiones de diámetros y altura de secciones (dm_i y Ac_i) a diferentes alturas de acuerdo con la forma del árbol y la visibilidad para medir el fuste, hasta llegar a la altura total (A) y diámetro cero (d_0). El cálculo del volumen por troza se realizó con la fórmula de Smalian y la punta del árbol con la fórmula del cono, el volumen total (V_t) por árbol se obtuvo con el método de trozas traslapadas (Bailey, 1995). La razón de volumen (r) en cada árbol se obtuvo al dividir el volumen comercial (V_c) entre el V_t .

La estadística descriptiva de la muestra integrada por 116 árboles, posterior a ser auditada y eliminar datos atípicos (tabla 1) señala que el rango de aplicabilidad del estudio va de las categorías diamétricas de 5 a 65 cm, con alturas entre los 6 a 26 m. El índice de Curtosis (IC) de la distribución normal indica que es de tipo Mesocúrtica en las dos variables (dn y A), mientras que el coeficiente de asimetría (CA) señala que la información de la variable dn tiene una ligera carga hacia la derecha (asimetría positiva) y la A hacia la izquierda (asimetría negativa).

Tabla 1. Estadística descriptiva de la muestra de árboles de *S. macrophylla* analizada.

Variable	Media	Ee	DE	Varianza	IC	CA	Mínimo	Máximo
dn	34.85	1.41	15.55	241.78	-1.17	0.03	7.10	62.80
A	16.22	0.40	4.38	19.22	-0.38	-0.40	5.77	25.50

dn: diámetro normal. *A*: altura total. *Ee*: error estándar. *DE*: desviación estándar. *IC*: índice de Curtosis. *CA*: coeficiente de asimetría.

Para el volumen total se evaluaron dos modelos reportados en literatura especializada (Da Cunha & Guimaraes, 2009; Muñoz *et al.*, 2012; Ramos-Uvilla *et al.*, 2014). Por su parte, de los modelos de razón de volumen evaluados, tres fueron basados en la razón porcentual del diámetro (R_d) y dos en la altura (R_h); estos fueron estudiados para las especies de *Fagus sylvatica*, *Eucalyptus grandis*, *E. nites* y *Pinus radiata* (Trincado *et al.*, 1997; Chauchard & Sbrancia, 2005; Gilabert & Paci, 2010; Barrios *et al.*, 2014; Hernández-Ramos *et al.*, 2017; tabla 2).

El ajuste de todos los modelos propuestos se realizó en el programa estadístico SAS 9.2 mediante el procedimiento de Proc Model que ajusta de igual forma modelos lineales y no lineales, y la técnica de máxima verosimilitud (Fiml, por sus siglas en inglés) (SAS Institute Inc., 2008). La selección de los mejores modelos se realizó de acuerdo a los menores valores en la suma de cuadrados del error (SCE) y en la raíz del cuadrado medio del

error (RCME), el mayor valor en el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj.}$) y la significancia de los parámetros (Da Cunha & Guimaraes, 2009).

La normalidad de los datos se verificó con la prueba de Shapiro-Wilk (SW) a un nivel de significancia del 5 % (Balzarini *et al.*, 2008). Al mejor modelo de V_t se le aplicó una regresión ponderada empleando el diámetro (d , d^2 , $1/d$ y $1/d^2$) y la variable combinada (dn^2A y $1/dn^2A$) como base sobre los residuales para corregir la heterocedasticidad evaluada de forma gráfica (Tschieder *et al.*, 2011). Por otra parte, a los dos mejores modelos de razón de volumen, tanto al emplear el diámetro (R_d) y la altura (R_h) a distintas secciones en el fuste, se les aplicó una estructura autorregresiva continua de primer orden (CAR[1]) utilizando la altura sobre el fuste a la cual se encuentra el diámetro evaluado (d) para corregir la autocorrelación, evaluada a través de la prueba de Durbin-Watson (DW) y la estructura utilizada por Zimmerman & Nuñez-Antón (2001) (8 y 9).

Tabla 2. Modelos de volumen total (V_t) y modelos de razón de volumen con diámetros (R_d) y de alturas (R_h) evaluados para *S. macrophylla* en el centro y sur de Quintana Roo.

N.º	Modelo	Expresión
(1)	Spurr	$V_t = b_0(dn^2 A)^{b_1} + e$
(2)	Meyer	$V_t = b_0 dn^{b_1} (dn^2 A)^{b_2} + e$
(3)	Van Deusen <i>et al.</i> (1981)	$R_d = \exp(b_0(\frac{dm}{dn})^{b_1}) + e$
(4)	Cao <i>et al.</i> (1980)	$R_d = 1 + b_0(\frac{dm}{dn}) + b_1(\frac{dm}{dn})^2 + b_2(\frac{dm}{dn})^3 + b_3(\frac{dm}{dn})^4 + b_4(\frac{dm}{dn})^5 + b_5(\frac{dm}{dn})^6 + e$
(5)	Honner (1967)	$R_d = b_0 + b_1(\frac{dm}{dn}) + b_3(\frac{dm}{dn})^2 + e$
(6)	Cao <i>et al.</i> (1980)	$R_h = 1 + b_0(A - Ac) + e$
(7)	Zepeda <i>et al.</i> (1990) citado por Prodan <i>et al.</i> , 1997.	$R_h = b_0(\frac{Ac}{A}) + b_1(\frac{Ac}{A})^2 + e$

dn : diámetro normal (cm). A : altura total (m). dm : diámetros a distintas secciones sobre el fuste (cm). Ac : altura a distintas secciones sobre el fuste (m). b_n : parámetros a ser estimados. e : término de error del modelo.

$$Y_{ij} = f(X_{ij}, B) + e_{ij} \quad (8) \text{ Donde}$$

$$e_{ij} = \sum_{k=1}^{k=X} I_k p_k^{h_{ij}-h_{ij-k}} e_{ij-k} + \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

donde Y_{ij} es el vector de la variable dependiente, X_{ij} la matriz de las variables independientes, B es el vector de los parámetros a estimar, e_{ij} es el j -ésimo residuo del árbol i , $I_k = 1$ para $j > k$ y es 0 para $j \leq k$, p_k es el parámetro autoregresivo de orden k a estimar, $h_{ij}-h_{ij-k}$ es la distancia que separa la altura de medición j -ésima de la altura de medición j -ésimo- k en cada árbol ($h_{ij} > h_{ij-k}$) y ε_{ij} es el error aleatorio (Barrios et al., 2014).

La evaluación de la capacidad predictiva de los modelos se realizó mediante el sesgo promedio (E) individual por estimación (10) y la diferencia agregada en por ciento ($DA\%$) para toda la muestra empleada (11) (Gilbert & Paci, 2010).

$$E = \frac{\sum y_i - \sum y'}{N} \quad (10) \text{ y}$$

$$DA\% = \frac{\sum y_i - \sum y'}{N} * 100 \quad (11)$$

Donde y_i son los datos observados, y' los valores predichos y N el número de observaciones.

La estimación del volumen comercial (V_c) a cualquier medida específica del fuste del árbol (diámetro o altura mínima comercial) se obtuvo a través de la construcción de un sistema de cubicación compuesto por los mejores modelos de razón y de V_t como lo recomienda Chauchard & Sbrancia (2005).

RESULTADOS

Modelo de volumen total (V_t)

El ajuste estadístico de los modelos de V_t , de acuerdo con $R^2_{aj.}$ indica que las variables independientes explican más del 96 % de la variabilidad de la variable dependiente, los valores en la SCE y la $RCME$ son semejantes para ambos modelos y sus parámetros son significativos al 5 % de significancia (tabla 3).

La prueba de SW mostró normalidad en ambos modelos al presentar un valor de 0.96 a un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, mientras que la variable de ponderación que mejores resultados mostró en ambos modelos para corregir la heterocedasticidad fue el inverso de la variable combinada ($1/dn^2A$). La prueba de DW mostró que los modelos de Spurr y Meyer no presentaron problemas de auto correlación en V_t (tabla 3).

Tabla 3. Ajuste estadístico, valores de los parámetros de los modelos de V_t evaluados para para *S. macrophylla* y prueba de autocorrelación de Durbin-Watson (DW).

Modelo	SCE	RCME	$R^2_{aj.}$	DW	Parámetro	Estimación	Ee	Valor t	Pr> t
(1)	0.0001	0.0010	0.9654	1.5	b_0	0.000046	0.000017	2.80	0.0060
					b_1	0.973468	0.032900	29.56	<0.0001
(2)	0.0001	0.0010	0.9666	1.6	b_0	0.000062	0.000024	2.58	0.0110
					b_1	0.560998	0.232400	2.41	0.0173
					b_2	0.744073	0.106100	7.01	<0.0001

SCE : suma de cuadrados del error. $RCME$: raíz del cuadrado medio del error. $R^2_{aj.}$: coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros. DW : valor del estadístico de Durbin-Watson. Ee : error estándar.

Modelos de razón de volumen (r)

Los modelos de razón de volumen tuvieron parámetros significativos y valores bajos en la *SCE* y en la *RCME*, además de una R^2_{aj} con valores entre 0.82 y 0.98 (tabla 4). En todos los modelos se corrigió la autocorrelación de los errores aplicando un retardo de primer orden (*p1r*) para así obtener valores en la prueba de *DW* superiores a 1.5 y cercanos a 2.

Los modelos basados en el *dm* explican la variabilidad presente entre el 82 % y 96 %, mientras

que los modelos que utilizan la *Ac* fueron de entre 93 % y 98 %. Al evaluar los modelos a través de los valores de *SCE*, *RCME* y R^2_{aj} , los mejores fueron el de Van Deusen *et al.* (1981) cuando se usa el *dm* como variable independiente y el de Zepeda *et al.* (1990) que utiliza el *Ac*.

La prueba de *SW* en los modelos señala que la frecuencia de los residuales estudentizados es normal ($SW > 0.93$, $\alpha = 0.05$). Para el caso de la distribución de residuales fue homocedástica en los dos modelos (figura 1).

Tabla 4. Ajuste estadístico y valores de los parámetros de los modelos de razón de volumen (R_d y R_h) para *S. macrophylla*.

Modelo	SCE	RCME	R^2_{aj}	DW	Parámetro	Estimación	Ee	Valor t	Pr > t
(3)	4.9855	0.0801	0.9481	1.9	b_0	-1.651380	0.02730	-60.38	<0.0001
					b_1	4.950237	0.07920	62.48	<0.0001
					<i>p1r</i>	0.531707	0.04100	12.98	<0.0001
(4)	4.8133	0.0735	0.9625	2.0	b_0	1.517662	0.59990	2.53	0.0116
					b_1	-14.638700	4.17100	-3.51	0.0005
					b_2	48.107160	11.23140	4.28	<0.0001
					b_3	-72.323500	14.49240	-4.99	<0.0001
					b_4	48.143700	8.97040	5.37	<0.0001
					b_5	-11.614900	2.13790	-5.43	<0.0001
					<i>p1r</i>	0.537016	0.03600	14.91	<0.0001
(5)	22.6086	0.1588	0.8249	1.8	b_0	-0.051610	0.00059	-87.21	<0.0001
					<i>p1r</i>	0.846415	0.01890	44.83	<0.0001
(6)	7.8978	0.0940	0.9387	1.9	b_0	1.006487	0.03600	27.99	<0.0001
					b_1	0.264353	0.07580	3.49	0.0005
					b_2	-1.027900	0.03830	-26.81	<0.0001
					<i>p1r</i>	0.308879	0.02380	12.96	<0.0001
(7)	1.6543	0.0430	0.9872	1.6	b_0	1.976532	0.01210	162.73	<0.0001
					b_1	-0.938700	0.00722	-129.98	<0.0001
					<i>p1r</i>	0.936433	0.01770	52.87	<0.0001

SCE: suma de cuadrados del error. *RCME*: raíz del cuadrado medio del error. R^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros. *DW*: valor del estadístico de Durbin-Watson. *Ee*: error estándar.

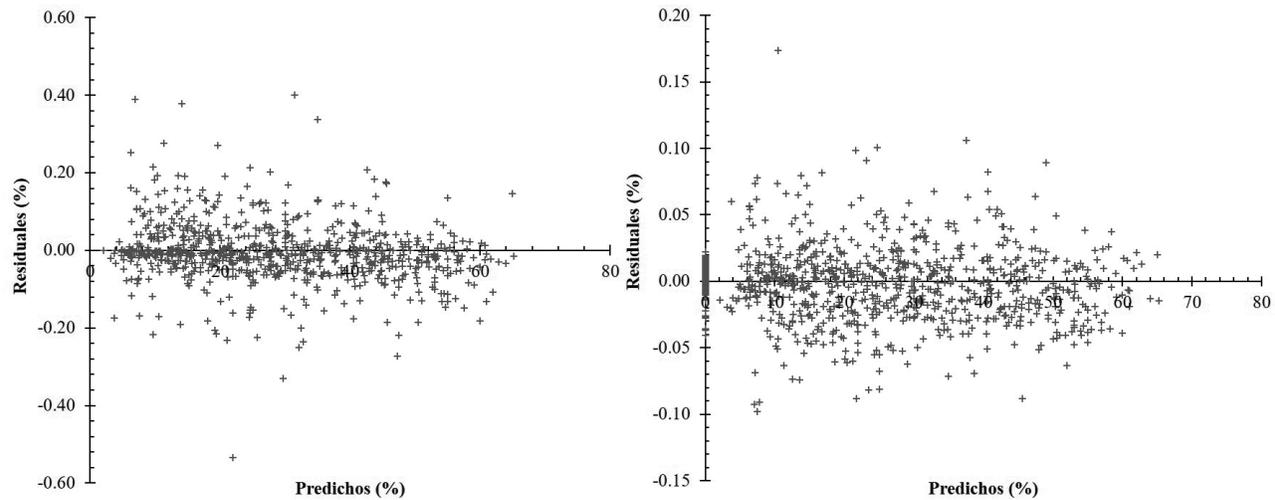


Figura 1. Distribución de residuales vs. valores predichos de los modelos de razón de R_d (izquierda) y R_h (derecha) para *S. macrophylla*.

El sesgo individual es de -0.0121 y 0.0053 para los mejores modelos de razón volumétrica 3 y 7, respectivamente; mientras que la DA es menor a 1 % (-0.0175 y -0.0017). Al graficar la razón volumétrica de los datos observados frente a los valores predichos, la tendencia se asemeja a una línea recta que indica la adecuada estimación de las ecuaciones obtenidas (figura 2).

Sistema de cubicación de V_c

Los sistemas de volumen comercial (V_c) al utilizar componentes de un modelo de V_t y uno de razón de volumen (r) para *S. macrophylla* al considerar dm (3) y Ac (7), adoptan las siguientes formas:

$$V_c = 0.000046(dm^2A)^{0.973468} \exp(1.65138(dm/dn)^{4.950237}) \quad (12)$$

$$V_c = 0.000046(dm^2A)^{0.973468} 1.976532\left(\frac{Ac}{A}\right) - 0.9387\left(\frac{Ac}{A}\right)^2 \quad (13)$$

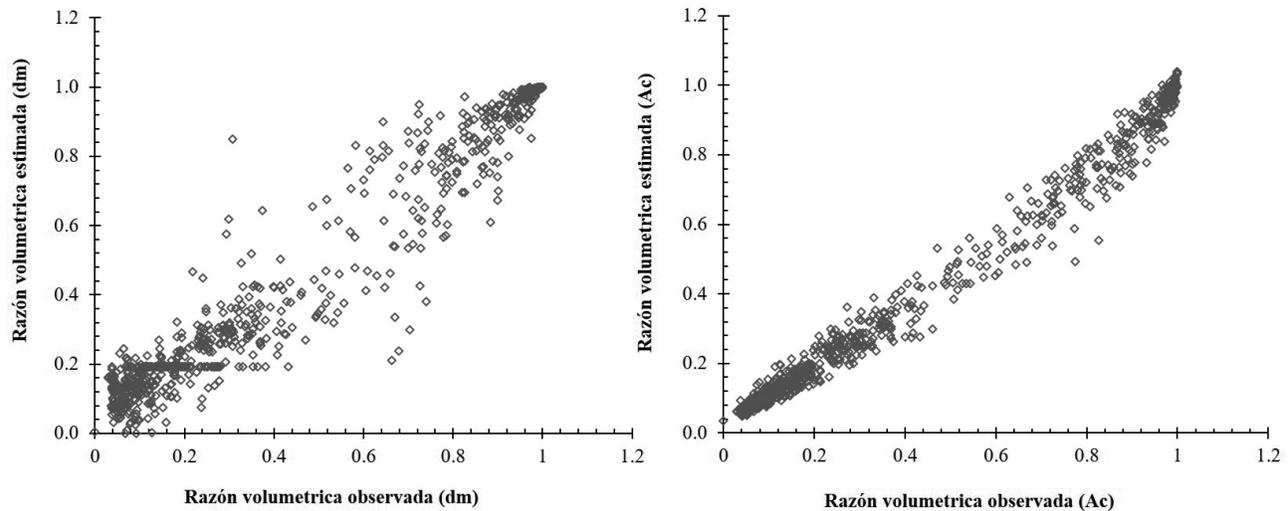


Figura 2. Razón de volumen (r) entre estimados y predichos de los modelos 3 (izquierda) y 7 (derecha) para *S. macrophylla*.

La evaluación de la capacidad predictiva de los sistemas revela que la DA % es de 4.5 % con el modelo de [Van Deusen et al. \(1981\)](#) que utiliza dm como variable explicativa, mientras que tal diferencia es de 1.6 % al usar el modelo de [Zepeda et al. \(1990\)](#) que utiliza a Ac .

Con la finalidad de ampliar la aplicabilidad de los sistemas generados y poder estimar cualquier diámetro o altura comercial para *S. macrophylla*, solo se despeja dm de la [ecuación 3](#) y se reemplaza por R_{hr} (14), o de forma opuesta, se despeja Ac de 7 y se reemplaza por R_{dr} (15).

$$dm = \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{R_{hr}}{b_0}\right)}{b_1}\right) dn \quad (14) \quad \text{y} \quad Ac = \frac{R_{dr}A}{b_0 + b_1} \quad (15)$$

DISCUSIÓN

Los valores tanto en el IC como el CA indican que la forma y simetría de la distribución de los datos utilizados es normal, debido a que IC tiene un valor inferior a dos, tal como lo describen [Murray \(1985\)](#) y [Martínez-González et al. \(2006\)](#), mientras que para el CA el valor es cercano a cero ([IBM, 2011](#)).

Para los dos modelos de Vt la prueba de SW mostró normalidad deseable como lo indican [Martínez-González et al. \(2006\)](#) al explicar los supuestos que se deberán de cumplir en una regresión y [Da Cunha et al. \(2009\)](#) al mencionar la forma de seleccionar estadísticamente el mejor modelo de Vt . Por otro lado, al realizar la corrección por heterocedasticidad con base a lo descrito por [Tschieder et al. \(2011\)](#) y utilizado por [Cruz et al. \(2016\)](#) al ajustar modelos de volumen para *Arbutus* spp. De estos se obtuvieron resultados adecuados, situación que cumple con lo mencionado por [Torres & Magaña \(2001\)](#) donde los modelos de Vt presentan con frecuencia problemas de heterocedasticidad debido a que, a mayor diámetro y altura, los errores en los volúmenes son mayores, por lo cual se deberá evitar que esto suceda y ocasionar que los residuales se distribuyan homocedasticamente. La prueba de DW no reportó problemas de auto

correlación en los modelos de Vt , ya que el valor fue superior a 1.5 como lo describen [Barrios et al. \(2014\)](#) al emplear un procedimiento similar al predecir los volúmenes comerciales de *E. grandis* a través de modelos de volumen total y de razón.

De acuerdo con el principio de parsimonia descrito por [Concari \(2001\)](#) y aplicado por [Sánchez & Montero \(2004\)](#) y a que el modelo de Meyer presentó parámetros no significativos, se seleccionó el modelo de Spurr para ser incluido en el sistema de cubicación de árboles individuales de *S. macrophylla*. Este modelo mostró resultados satisfactorios al ser utilizado en otros estudios para estimar el Vt , por ejemplo, para *Pinus michoacana* Mtz. y *Pinus michoacana* Martínez en Michoacán, México ([García et al. 2013](#)) y *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* en la región sur de Uruguay ([Moras & Vallejo-Barra, 2013](#)).

El modelo de Spurr describe la forma geométrica del árbol ([Spurr, 1952; Tlaxcala-Méndez et al., 2016](#)). Por lo tanto, con el valor del parámetro b_0 se puede observar un factor de forma del fuste de $ff=0.49$ calculado con la expresión ($ff = \beta_0 \times 40000/\pi$), por lo que de acuerdo al valor del parámetro b_0 en el modelo de Spurr, se puede afirmar que la forma promedio del fuste para esta especie es de tipo paraboloides casi perfecto ($ff=0.5$ corresponde a un paraboloides). El valor de ff aquí obtenido es similar al promedio de 0.46 reportado por [Esnacifor-OIMT \(2003\)](#) para esta misma especie en Honduras y al reportado por [Hernández-Ramos et al. \(2016\)](#) para esta especie en Quintana Roo, México de 0.48; sin embargo, es inferior a la reportada por [Patiño et al. \(1994\)](#) de 0.57 en la península de Yucatán.

En los modelos de razón de volumen la corrección por autocorrelación de los errores concuerda con lo propuesto por [Verbeek \(2004\)](#), de tal forma que al aplicar solamente un retardo ($p1r$) dentro del modelo $CAR(X)$ se corrigió este problema, tal y como lo realizan [Barrio et al. \(2007\)](#) al construir un sistema de cubicación y clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* en España; [Barrios et al. \(2014\)](#) al predecir y clasificar el Vc de *E. grandis* en Colombia; [Quiñonez-Barraza](#)

et al. (2014) y Tamarit *et al.* (2014) ambos al construir un sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus spp.* y *Tectona grandis*, respectivamente; y Hernández-Ramos *et al.* (2017) al estimar el volumen comercial en plantaciones de *E. urophylla* mediante modelos de volumen fustal y de razón de volumen.

La prueba de SW en los modelos de razón de volumen señala que la frecuencia de los residuales es normal, tal como lo señalan Martínez-González *et al.* (2006) y es aplicado por Montes *et al.* (2011) al emplear modelos que describen el ahusamiento en *Pinus leiophylla* para un bosque de coníferas en Durango, México; así como Hernández-Ramos *et al.* (2017) al emplear sistemas compatibles de volumen comercial y ahusamiento (V_c-dm) en plantaciones forestales de *P. greggii* en Hidalgo, México. Mientras que la distribución de residuales fue homocedástica en los dos modelos de acuerdo al análisis gráfico de su distribución, semejante a lo reportado por Barrio *et al.* (2004) en *Quercus robur* y Barrios *et al.* (2014) en *E. grandis* en la estimación de volumen comercial a través de funciones de razón.

El sesgo individual y la DA obtenidos son superiores a los reportados por Trincado & Vidal (1999) al aplicar una función de interpolación para modelar el ahusamiento en *Nothofagus pumilio* y Barrios *et al.* (2014) al construir un sistema de cubicación para *E. grandis*, además fueron semejantes a los reportados por Chauchard & Sbrancia (2005) al aplicar funciones de razón volumétrica en *Pinus radiata*. De igual manera, fueron semejantes a los reportados por Rodríguez-Toro *et al.* (2016) al ajustar modelos de ahusamiento para *E. nitens* en Chile. Las tendencias de los datos observados versus los valores estimados cumplen con lo descrito por Casnati *et al.* (2014) al ajustar sistemas compatibles de V_c-dm para *Pinus taeda* (L.) y *E. grandis* en Uruguay, donde al graficar ambos valores la tendencia será hacia la línea recta.

Con los sistemas de volumen comercial (V_c) propuestos, se puede encontrar la razón acumulativa del volumen a medida que aumenta la altura en el fuste (A_c), además del volumen correspondiente a

cualquier diámetro o altura límite establecido (dm) para *S. macrophylla* en Quintana Roo, México, al igual que lo hicieron Trincado *et al.* (1997) para *Fagus sylvatica* en Alemania; Chauchard & Sbrancia (2005) en *Pino radiata* en España; y Barrios *et al.* (2014) en *Eucalyptus grandis* en Colombia.

El resultado de la evaluación de la capacidad predictiva de los sistemas revela que son precisos en las estimaciones de V_t y V_c ; además, son semejantes a lo encontrado por Chauchard & Sbrancia (2005) y Barrio *et al.* (2007) ambos en *P. radiata*; Barrios *et al.* (2014) en *E. grandis* y Hernández-Ramos *et al.* (2017) en *E. urophylla*, sin presentar estimaciones entrecruzadas con respecto al V_t como lo menciona Prodan *et al.* (1997) al emplear este tipo de modelos en la estimación del V_c .

Los modelos de V_c analizados en este estudio presenta una ventaja comparativa respecto a los modelos de ahusamiento, que también estiman el volumen comercial variable de árboles individuales. Sin duda, el V_c presenta una parsimonia por la estructura matemática ya que permite una aplicación rápida y directa en las estimaciones de volumen comercial, además de que estos sistemas de V_c son de fácil implementación operativa, sin que se tenga la necesidad de realizar procesos complejos. Mientras que las expresiones 10 y 11 arrojan como resultado la razón de proporción del A_c con respecto al dn y del dm en función con la A , respectivamente.

CONCLUSIONES

Con los modelos de razón de volumen evaluados se determinó la proporción en los árboles de *S. macrophylla* entre el volumen total con respecto al volumen comercial a medida que la altura en el fuste se acerca a la altura total.

El conjunto de ecuaciones desarrolladas es confiable para construir un sistema de cubicación y con este poder realizar estimaciones de volumen comercial o de distribución de productos para un mercado diferenciado donde se establece un diámetro o altura límite de utilización.

Con el despeje matemático de los modelos de razón seleccionados y la apropiada combinación entre las expresiones de volumen que emplean el diámetro y/o la altura a diferentes secciones del árbol, se puede calcular de forma confiable cualquier altura o diámetro comercial de interés.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el gobierno del estado de Quintana Roo a través del Instituto Forestal (INFOQROO) por medio del proyecto "Estudio para realizar acciones de tablas de volúmenes de 8 especies forestales maderables". SIN-COP-INIFAP 232179Y.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albrecht, H., Belisle, M., Caballero, C., Forster, R., Gallotti, H., Lacayo, O., Robinson, D., & Ortiz, S.** (2002). Comunidades forestales y el mercado de maderas tropicales poco comerciales de Mesoamérica. México, D. F.: Ed. Durece S. A. 158 p
- Alder, D.** (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. vol. II – Predicción del rendimiento. Estudio FAO: Montes 22/2. Roma, Italia: FAO. 80 p.
- Apodaca-Martínez, M., Curiel-Alcaraz, G.M., Mendoza-Briseño, M.A., Vargas-Mendoza, M., Valdez, H.I.J., & Platas, R.D.E.** (2014). El plan costa como una mejor opción de manejo para especies tropicales de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(22), 10-25.
- Bailey, R.L.** (1995). Upper-stem volumes from stem-analysis data: An overlapping bolt method. *Canadian Journal of Forest Research*, 25, 170-173. DOI: <https://doi.org/10.1139/x95-020>
- Balzarini, M.G., González, M.L., Tablada, F., Casanoves, J., Di Rienzo, A., & Robledo, C.W.** (2008). *Infostat, manual del usuario*. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas. 336 p.
- Barrena, B., Dancé, C., & Sáenz, T.D.** (1986). Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú*, 13(2), 1-10.
- Barrio, A.M., Álvarez, G.J.G., & Díaz-Maroto, H.I.J.** (2004). Elaboración de una tarifa con clasificación de productos para *Quercus robur* L. en Galicia basada en un modelo de volumen porcentual. Investigación agraria. *Sistemas y recursos forestales*, 13(3), 506-517.
- Barrios, A., López, A.M., & Nieto, V.** (2014). Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. *Colombia Forestal*, 17, 137-149. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a01>
- Barrio, M., Sixto, H., Cañellas, I., & González, F.** (2007). Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I-214' en la meseta norte y centro de España. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16, 65-75.
- Casnati, C. R., Mason, E.M., Woollons, R., & Resquin, F.** (2014). Volume and taper equations for *P. taeda* (L.) and *E. grandis* (Hill ex. Maiden). *Agrociencia Uruguay*, 18(2), 47-60.
- Cao, Q., Burkhart, H., & Max, T.** (1980). Evaluation of two methods for cubic volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Sciences*, 26, 71-80.
- Chapela, F.** (2012). *Estado de los bosques de México*. México, D.F.: Consejo civil mexicano para la silvicultura sostenible A.C. 217 p.
- Chauchard, L., & Sbrancia, R.** (2005). Funciones de razón para la estimación de los volúmenes maderables de Pino radiata en el País Vasco. *Investigación*

- Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14, 185-194.
DOI: <https://doi.org/10.5424/srf/2005142-00883>
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES).** (2016). Apéndices I, II y III: En vigor a partir del 4 de abril de 2017. Recuperado de: <https://cites.org/esp/app/appendices.php>
- Concari, S.B.** (2001). Las teorías y modelos en la explicación científica: implicaciones para la enseñanza de las ciencias. *Ciencia y educación*, 7(1), 85-94.
- Cruz, C.F., Mendía S.R., Jiménez F.A.A., Nájera L.J.A., & Cruz G.F.** (2016). Ecuaciones de volumen para *Arbutus spp.* (madroño) en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*, 24(68), 41-47.
- Da Cunha, T.A., & Guimaraes, F.C.A.** (2009a). Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. Nota Técnica. Kurú: *Revista Forestal* (Costa Rica), 6(16), 1-15.
- Da Cunha, T.A., Vargas, M.J.O., & Escalier, H.M.** (2009b). Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. Documento técnico n.º 5-2009/ Proyecto de Manejo de Bosques en Bolivia (Fomabo). Cochabamba, Bolivia: Escuela de Ciencias Forestales de la Universidad Mayor de San Simón. 28 p.
- Escuela Nacional de Ciencias Forestales-Organización Internacional de las Maderas Tropicales (Esnacifor-OIMT).** (2003). Guías silviculturales de 23 especies forestales del bosque húmedo de Honduras. Proyecto PD 022/99 Rev.2 (F) Estudio de comportamiento de especies maderables Nativas con Importancia Comercial del Bosque Húmedo tropical en Honduras. Siguatepeque, Comayagua, Honduras: Esnacifor-OIMT. 261 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).** (2017). Conjunto de Herramientas para la Gestión Forestal Sostenible (GFS). Recuperado de: <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/silviculture-in-natural-forests/basic-knowledge/es/>
- García, E.** (2004). Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. Serie 6. México, D.F.: Instituto Nacional de Geografía-Unam. 98 p.
- García, M.J.J., Velarde, R.J.C., Hernández, R.J., García, C.X., Muñoz, F.H.J., & García, E.G.G.** (2013). Ecuaciones para determinar el volumen en pie para árboles de *Pinus michoacana* Mtz. y *Pinus michoacana var. Cornuta* Martínez, en dos municipios de Michoacán. *Ciencia Nicolaita*, 58, 67-89.
- Gilabert, H., & Paci, C.** (2010). An assessment of volume-ratio functions for *Eucalyptus globulus* and *E. nites* in Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 37(1), 5-15. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-16202010000100001>
- Hernández-Ramos, J., De los Santos-Posadas, H.M., Valdéz-Lazalde, J.R., Tamarit-Urias, J.C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Méndez-Lopez, B., & Pedizzi, A.** (2017). Estimación del volumen comercial en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* con modelos de volumen total y de razón. *Agrociencia*, 51, 561-580.
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas, X., Martínez-Salvador, M., & García-Espinoza, G.G.** (2016). Funciones de perfil para árboles de *Swietenia macrophylla* King en Quintana Roo, México. *Revista Mitigación del Daño Ambiental Agropecuario y Forestal de México*, 2(2), 151-157.
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Magaña, J.J., García-Cuevas, X., García-Espinoza, G.G., Muñoz-Flores, H.J., & Olvera-Delgadillo, E.H.** (2017). Sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. en Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(39), 59-70.
- Honner, T.G.** (1967). Standard volume tables and merchantable conversion factors for the commercial tree species of central and eastern Canada. Information Report FMR-X-5. Forest Management Research and Service Institute. 162 p.
- International Business Machines (IBM).** (2011). *IBM SPSS Statistics Base 22*. Armonk, N.Y. EE. UU.: IBM Corporation. 211p.
- Magaña, T.O.S., Torres, R.J.M., Rodríguez, F.C.A., Aguirre, D.H., & Fierros, G.A.M.** (2008). Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rudis* Endl. en Aloapan, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14(1), 5-19.

- Martínez-González, M.A., Sánchez-Villegas, A., & Faulin-Fajardo, J.** (2006). Bioestadística amigable. 2^{da} edición. Barcelona: Editorial Díaz de Santos. 919 p.
- Montes de Oca, C.E., Rojas, M.J.C., & Corral, R.S.** (2011). Modelos de ahusamiento para *Pinus leillophylla* en la localidad de Chavarría Nuevo, Durango, México. *InterSedes*, 12(24), 129-135.
- Mora, F., & Hernández, W.** (2007). Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el pacífico de Costa Rica. Nota Técnica. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 101-112.
- Moras, G., & Vallejos-Barra, O.S.** (2013). Tabla de volumen para árboles individuales de *Eucalyptus globulus* ssp. *Globulus* cultivados en la región sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 17(2), 11-24.
- Muñoz, F.H.J., Velarde, R.J.C., García, M.J.J., Sáenz, R.J.T., Olvera, D.E.H., & Hernández, R.J.** (2012). Predicción de volúmenes de fuste total para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(14), 11-22.
- Murray, R.S.** (1985). *Estadística: teoría y 875 problemas resueltos*. Serie Schaum. México, D.F.: Editorial McGraw-Hill. 357 p.
- Negreros-Castillo, P., & Martínez Salazar, I.** (2011). Crecimiento y regeneración avanzada de *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth. en una selva de Quintana Roo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5), 15-27.
- Negreros-Castillo, P., & Mize, C.** (2012). Soil-site preferences for mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in the Yucatan Peninsula. *New Forests*, 44(1), 85-99. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9303-7>
- Negreros-Castillo, P., Cámara-Cabrales L., Devall M.S., Fajvan M.A., Mendoza Briseño M.A., Mize C. W., & Navarro-Martínez A.** (2014). Silvicultura de las selvas de caoba en Quintana Roo, México: Criterios y recomendaciones. Jalisco, México: Semarnat. 186 p.
- Patiño, V.F., López T.J.L., & Gómez A.D.** (1994). Selva (versión 4). Paquete de cómputo para procesar datos de inventarios forestales para especies de la península de Yucatán. Folleto técnico. Mérida, Yucatán, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Inifap). 46 p.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P.** (1997). Mensura forestal. Serie investigación y educación en desarrollo sostenible. San José, Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH-Instituto Internacional de cooperación para la Agricultura (GTZ-IIICA). 586 p.
- Ramos-Uvilla, J.A., García-Magaña, J.J., Hernández-Ramos, J., García-Cuevas, X., Velarde-Ramírez, J.C., Muñoz-Flores, H.J., & García-Espinoza, G.G.** (2014). Ecuaciones y tablas de volumen para dos especies de *Pinus* de la Sierra Purhépecha, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(23), 92-108.
- Rodríguez-Toro, A., Rubilar-Pons, R., Muñoz-Sáez, F., Cártes-Rodríguez, E., Acuña-Carmona, E., & Cancino-Cancino, J.** (2016a). Taper model by type of soil for *Pinus radiata* in the regions of Biobío and the Araucanía, Chile. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 203-220. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.05.021>
- Rodríguez-Toro, A., Rubilar-Pons, R., Muñoz-Sáez, F., Cártes-Rodríguez, E., Acuña-Carmona, E., & Cancino-Cancino, J.** (2016b). 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.
- Sánchez, G.M., & Montero, G.G.** (2004). Modelo de incremento en diámetro para *Quercus suber* L. en el parque natural de Los Alcornocales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 18, 2005-2009.
- SAS Institute Inc.** (2008). SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition. Raleigh, NC, EE. UU.: SAS Institute Inc. s/p. Recuperado de: <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm>
- Secretaría de Desarrollo Económico de Quintana Roo (Sedeqroo).** (2005). Plan Gran Visión 2000-2025-Quintana Roo: Avances al 2005. Quintana Roo, México: Editorial Sedeqroo. 202 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).** (2016). Anuario estadístico de la producción forestal 2015. México, D.F.: Semarnat. 228 p.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional Forestal (Semarnat-Conafor).** (2014). *Inventario estatal forestal y de suelos-Quintana Roo 2013. Colección de inventarios estatales forestales y de suelos 2013-2014.* Jalisco, México: Editorial Prometeo. 125 p.
- Sol-Sánchez, A., Sánchez-Gutiérrez, F., Hernández-Melchor, G.I., Zamora, C.L.F., Sardiña, G.O., Rivera, C., & Toruño, P.J.** (2015). Volumen medible de mangle negro (*Avicennia germinans* L.) impactado por herbivoría de *Anacamptodes* sp. en Cárdenas, Tabasco. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 1(1), 115-133. DOI: <https://doi.org/10.5377/ribcc.v1i1.2145>
- Spurr, S.H.** (1952). *Forest Inventory.* Nueva York: Ronald Press. 476 p.
- Synnott, T.J.** (2007). La caoba en la península de Yucatán. Reporte final: diagnóstico de los sistemas de silvicultura de caoba en los corredores de la península de Yucatán (CBM-M/UTRP/2C/011/2006). Coahuila, México: Comisión Nacional para la Biodiversidad (Conabio). 22 p.
- Tlaxcala-Méndez, R.M., De los Santos-Posadas, H.M., Hernández-De la Rosa, P., & López-Ayala, J.L.** (2016). Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia*, 50(1), 89-15.
- Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas H.M., Álvarez-González J.G., & Velázquez-Martínez A.** (2014). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia*, 48(5), 553-567.
- Tamarit, U.J.C., De los Santos P.H.M., Aldrete A., Valdez-Lazalde J.R., Ramírez M.H., & Guerra C.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.
- Torres, R.J.M., & Magaña, T.O.S.** (2001). *Evaluación de plantaciones forestales.* México, D.F.: Editorial Limusa. 472 p.
- Torres, R.J.M.** (2004). Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 145 p.
- Trincado, V.G., & Vidal, B.J.** (1999). Aplicación de interpolación "Spline" cúbica en la estimación de volumen. *Bosque*, 20(2), 3-8. DOI: <https://doi.org/10.4206/bosque.1999.v20n2-01>
- Trincado, V.G., Von Gadow, K., & Sandoval, V.** (1997). Estimación de volumen comercial en latifoliadas. *Bosque*, 18, 39-44. DOI: <https://doi.org/10.4206/bosque.1997.v18n1-05>
- Tschieder, E.F., Fassola, H.E., & García, C.M.** (2011). Ecuaciones de volumen total para *Populus deltoides* de plantaciones del bajo delta del Paraná. *Revista de Investigaciones Agropecuaria*, 37, 172-179.
- Uranga-Valencia, L.P., De los Santos-Posadas, H.M., Valdéz-Lazalde, J.R., López-Upton, J., & 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.
- Van Deusen, P., Sullivan, A., & Matney, T.** (1981). A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *Southern Journal of Applied Forestry*, 5, 186-189.
- Velasco, B.E., Madrigal, H.S., Vázquez, C.I., González, H.A., & Moreno, S.F.** (2006). Manual para la elaboración de tablas de volumen fustal en pino. Libro técnico n.º 1. México, D.F.: INIFAP-Conacyt-Conafor. 34 p.
- Verbeek, M.** (2004). *A guide to modern econometrics.* 2 ed. West Sussex: John Wiley & Sons. Rotterdam, Países Bajos: Erasmus University Rotterdam. 429 p.
- Zimmerman, D.L., & Núñez-Antón, V.** (2001). Parametric modelling of growth curve data: An overview (with discussion). *Test*, 10,1-73. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02595823>



IMPACTO DE *Alnus acuminata* Kunth EN LOS FLUJOS DE N₂O Y CALIDAD DEL PASTO *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov

Alnus acuminata Kunth impact on N₂O fluxes and quality of *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov grass

Amanda Silva-Parra¹, Seydyss Garay-Rodríguez² & Arturo S. Gómez-Insuasti³

Silva-Parra, A., Garay-Rodríguez, S., & Gómez-Insuasti, A. (2018). Impacto de *Alnus acuminata* Kunth en los flujos de N₂O y calidad del pasto *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. *Colombia Forestal*, 21(1), 47-57

Recepción: 15 de febrero de 2017

Aprobación: 28 de agosto de 2017

Resumen

El Aliso *Alnus acuminata* Kunth es un forestal del trópico alto de Colombia que se asocia con pasto *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov como sistema silvopastoril (SSP) y fija N atmosférico. El SSP se comparó con 0, 50, 100, 150 y 200 kg.N.ha⁻¹. año⁻¹ a los 30, 45 y 60 días sobre la calidad del pasto, expresada en forraje verde (FV), materia seca (MS), porcentaje de proteína cruda (%PC) y N absorbido; también se evaluaron los flujos de emisiones de N₂O a la atmósfera. El SSP superó a 0 y 50 kg.N.ha⁻¹ en todas las variables, menos en los flujos de emisiones de N₂O que fue mayor a 0 kg.N.ha⁻¹ (P<0.05) e igual a 50 kg.N.ha⁻¹ (P>0.05) y en FV fue similar a 100 kg.N.ha⁻¹ (p>0.05); 150 y 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ superó en todas las variables al SSP. Se alcanzó mayor FV y MS a los 45 días y %PC a los 30 días.

Palabras clave: calentamiento global, deforestación, forestal, gases de efecto invernadero GEI, productividad de las pasturas.

Abstract

The Aliso *Alnus acuminata* Kunth is a forest species of the of the Colombian Andes associated with Kikuyu grass as silvopastoral system (SPS) and fixe atmospheric N. The SPS was compared with 0, 50, 100, 150 and 200 kg N ha⁻¹ year⁻¹ at 30, 45 and 60 days on pasture quality, expressed as green forage (GF), dry matter (DM), percentage of crude protein (% CP) and N absorbed, also fluxes N₂O emissions to the atmosphere were evaluated. The SPS exceeded to 0 and 50 kg.N.ha⁻¹ in all variables, less in the N₂O emission fluxes that was greater than 0 kg.N.ha⁻¹ (P<0.05), equal to 50 kg.N.ha⁻¹ (P>0.05), and in GF was similar to 100 kg.N.ha⁻¹ (p>0.05). 150 and 200 kg.N.ha⁻¹.year⁻¹ exceeded all the variables to the SSP. A higher GF and DM was achieved at 45 days and %CP at 30 days.

Key words: global warming, deforestation, forestry, greenhouse gases GHG, pastures productivity.

1 Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia. asilvap@unillanos.edu.co. Autor para correspondencia.

2 Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia. sgaray@unillanos.edu.co

3 Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. asgomezi@yahoo.com.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción ganadera en el trópico alto de Colombia han sido responsables en gran parte de los altos ritmos de deforestación, provocados principalmente por los cambios en los usos del suelo, debido a la conversión de bosques naturales en pastizales permanentes (Staley *et al.*, 2008; Murgueitio *et al.*, 2011).

Esto ha provocado procesos de degradación en el suelo y las pasturas, disminuyendo su fertilidad física y química (Zapata *et al.*, 2009; Hansen *et al.*, 2010) y la capacidad productiva de las pasturas en el corto, mediano y largo plazo (Murgueitio *et al.*, 2011).

Para contrarrestar la baja capacidad de producción de las pasturas, se ha recurrido a la fertilización nitrogenada (Teitzel *et al.*, 1991; Soto *et al.*, 2005), invirtiendo grandes cantidades de N, principalmente de Urea, que han incrementado los costos de producción (Soto *et al.*, 2005). Estos son causantes también de efectos negativos en el medio ambiente y aumentos de GEI debido a las emisiones de N₂O a la atmósfera (Pattey *et al.*, 2005; IPCC, 2007).

Se estima que los sistemas agropecuarios son responsables directamente entre un 10 y un 12 % de las emisiones totales de GEI (Smith *et al.*, 2008). El N₂O ha sido responsable por el 5 % del efecto invernadero total a lo largo de los últimos 100 años (IPCC, 2006) y presenta un potencial de calentamiento global de 310 veces el de CO₂ (IPCC, 2007). La mayor parte de estas emisiones tienen lugar en forma de N₂O emitido por los suelos fertilizados (Smith *et al.*, 2008).

Las altas emisiones de GEI debidas a N₂O en sistemas de producción ganadera son provocadas por el manejo del estiércol y deposición de orinas y heces de los bovinos en las praderas (Bathia *et al.*, 2004). Según el IPCC (2006), las emisiones directas de N₂O de las excreciones bovinas (heces y orina), equivalen al 2 % del N presente en las excretas y por la fertilización de pasturas (Bolan *et al.*, 2004), y en una menor escala por el manejo de los residuos (IPCC, 2006).

Se ha estimado que alrededor de 1.5 teragramos (1 teragramo equivale a 1 megatón y este a 1 000 000 t) de N son introducidos directamente a la atmósfera cada año bajo la forma de óxido nítrico, en donde las aplicaciones de fertilizantes a ecosistemas agrícolas (sin tener en cuenta abonos animales ni fijación biológica de nitrógeno) representa un 15.8 % de estas emisiones (IPCC, 2007). El N₂O es responsable por la reducción del ozono estratosférico (Phongpan & Mossier, 2003).

En las zonas de altura de los trópicos, la búsqueda de sistemas de producción más sostenibles tanto productiva como ambientalmente factibles se han convertido en una necesidad frente a los graves problemas de degradación de las pasturas, consolidándose los sistemas silvopastoriles (SSP) como alternativas viables a mediano y largo plazo (Naranjo *et al.*, 2012). Lo anterior, por la importancia que tienen en el mejoramiento de la calidad de los pastos y forrajes (Mahecha, 2002; Razz & Clavero, 2006), debido a un mayor reciclaje de nutrientes y mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y en la reducción de fertilizantes nitrogenados y de los flujos de GEI a la atmósfera (Murgueitio *et al.*, 2011; Naranjo *et al.*, 2012).

El Aliso (*A. acuminata* Kunth) es una especie que se viene implementando en Colombia con pasto kikuyo *Pennisetum clandestinum*, el cual es predominante en los sistemas ganaderos extensivos del trópico alto colombiano (Apráez & Moncayo, 2003), constituyéndose en un sistema silvopastoril de importancia (Murgueitio *et al.*, 2011). *A. acuminata* presenta en sus raíces una simbiosis tripartita con un actinomiceto del género *Frankia* y con especies de hongos micorrízicos (Becerra *et al.*, 2005), permitiendo que las plantas sean capaces de fijar N y absorber P, representando una ventaja también para el crecimiento de las pasturas (Beer, 1980).

Dentro de este contexto, y dada la importancia para el desarrollo de la ganadería sostenible en el trópico alto andino colombiano y en la minimización de GEI a la atmósfera, esta investigación tuvo

como objetivo evaluar el impacto del SSP de Aliso (*A. acuminata* Kunth) asociado con pasto kikuyo (*P. clandestinum* Hochst. ex Chiov) y diferentes dosis de N sobre la calidad forrajera del pasto kikuyo y los flujos de las emisiones de óxido nitroso N₂O a la atmósfera

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en una zona del altiplano de Pasto, vereda Obonuco, departamento de Nariño, Colombia. Ubicada en las coordenadas geográficas de latitud 1°12'52.48"N y longitud 77°16'41.22"O, a 2710 m de altitud, temperatura media de 12°C, precipitación promedio anual de 840 mm y una humedad relativa del 70 %.

El lugar de evaluación corresponde a una zona de vida Bs-pm (bosque seco premontano) (Holdridge, 1947); los suelos están clasificados como Vitric Haplustands originados de cenizas volcánicas, muy profundos a moderadamente profundos, desde bien a imperfectamente drenados y de fertilidad moderada a alta, pertenecen al grupo textural franco arcilloso y con pendiente de 10 % (IGAC, 2004).

Se utilizó una pradera establecida por más de 10 años con pasto kikuyo *P. clandestinum*.

Se evaluó un SSP extensivo de Aliso *A. acuminata* asociado con *P. clandestinum*, el cual no recibió fertilización de N con Urea, y se comparó con cinco niveles de fertilización nitrogenada a 0, 50, 100, 150 y 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹. Los árboles del forestal estaban organizados dentro del lote como cerca viva, a una distancia de 3 m, y con una edad aproximada de ocho años. Se evaluaron tres periodos de corte (30, 45 y 60 días), la fertilización nitrogenada se realizó al voleo con fertilizante Urea (0-0-46).

Para el estudio se empleó un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial 3 x 6, en parcelas divididas, asignando las parcelas principales al factor período de corte (factor A) y las subparcelas al factor B (tratamientos), con tres repeticiones, para un total de 18 tratamientos y 54

unidades experimentales en cada época. El modelo matemático corresponde a:

$$Y_{ijk} = \mu_{...} + \rho_{.k} + \alpha_i + \xi_{(\alpha)} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \xi_{(\beta)}$$

$$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, \dots, r$$

Donde:

Y_{ijk} = valor en el k bloque en la parcela i y la subparcela j .

$\mu_{...}$ = valor constante similar a la media de la población.

α_i = efecto del i -ésimo nivel del factor A.

$x_{(a)}$ = error experimental de parcelas grandes.

β_j = efecto del j -ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción del i -ésimo nivel del factor A con el bloque j -ésimo nivel del factor B.

$x_{(b)}$ = error experimental de sub parcelas.

Hipótesis $H_o : \alpha_i = 0$ $H_o : \beta_j = 0$ $H_o : (\alpha\beta)_{ij} = 0$

$H_a : \alpha_i \neq 0$ $H_a : \beta_j \neq 0$ $H_a : (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$

El área experimental fue una parcela de 14 m² (2 m x 7 m) y un área efectiva de corte de 9.75 m² (6.5 m x 1.5 m) correspondiendo a un borde de 0.25 entre parcela y 0.50 entre bloques, con separación entre parcelas de 2 m.

Mediante aforo, haciendo uso de un cuadro de 0.25 m por cada lado, se lanzó al azar tres veces en cada una de las parcelas y se estimó la biomasa de forraje verde FV, la cual se pesó, y fue expresada en t.ha⁻¹, luego se tomó una submuestra de 0.5 kg en bolsas de papel debidamente marcadas para análisis de tipo bromatológico (AOAC, 1975). Las muestras se secaron a 70°C en estufa de aire circulante por 72 horas y se determinó el contenido de materia seca, el cual en seguida se molió con un molino de martillo de criba de 1 mm. Para determinar las cantidades de N total de las muestras, se efectuó mediante el método de micro kjeldahl (AOAC, 1975). El N absorbido (kg.N.ha⁻¹.año⁻¹) en cada uno de los tratamientos se obtuvo a partir de los %PC.

Cálculo de los flujos de las emisiones de N₂O

Los flujos de las emisiones de N₂O correspondientes a estiércoles y manejo de residuos y fertilizantes se calcularon teniendo en cuenta las metodologías del IPCC (2006).

En el cálculo del flujo de las emisiones de N₂O, debido al manejo de los estiércoles, se consideró la ecuación 1 adaptada del IPCC (2006).

Consumo de N (kg.N.cab⁻¹.año⁻¹) = kg CMS x % PC / 100 / 6.25 ecuación 1.

Donde:

CMS = consumo de materia seca en kg.MS.día⁻¹.

%PC = porcentaje de proteína cruda, de los valores obtenidos en los análisis bromatológicos.

Para el cálculo de la cantidad de N excretado se aplicó la ecuación 2 adaptada del IPCC (2006).

Excreción de N (g.N.cab⁻¹.año⁻¹) = consumo de N (kg.N.cab⁻¹.año⁻¹) x % N retenido x 1000 ecuación 2.

Donde:

Consumo de N (kg.N.cab⁻¹.año⁻¹) = valor obtenido del cálculo en la ecuación 1.

%N retenido = 0.71 % N consumido.

Según Correa (2003), la fracción del consumo de N anual retenido por el animal es 0.71 en vacas lactantes, correspondiente a 0.40 en las heces y 0.31 retenido en las orinas, por lo cual, se asumió este valor. Para expresar los flujos de las emisiones en kg.N₂O.ha⁻¹.año⁻¹ se tuvo en cuenta la carga UGG ha⁻¹ (1 UGG=450 kg), en SSP extensivo se consideró 1.5 UGG ha⁻¹, en sistema extensivo de pastura degradada 0 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ 0.50 UGG.ha⁻¹, y para pasturas mejoradas 100, 150 y 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ 1.0 UGG.ha⁻¹ (Parra-Silva, 2015).

Para el cálculo del flujo de las emisiones de N₂O debido a residuos dejados por *P. clandestinum* en el SSP y las dosis de N, se consideraron las cantidades de N absorbido (kg.N.ha⁻¹.año⁻¹) a partir de los %PC obtenidos y las cantidades de

FV, considerando una fracción correspondiente a 0.1 % dejadas por residuos (IPCC, 2006). Se consideró un factor de emisión FE de 1.25 kg de N emitido kg de N⁻¹ en los residuos como fracción de N perdido durante el proceso de nitrificación y un FE de 0.01 kg de N emitido kg de N⁻¹ en los residuos como fracción de N en los residuos que se volatiliza como NH₃ y NOx (IPCC, 2006).

Los mismos FE fueron utilizados para calcular los flujos de las emisiones de óxido nitroso debido a fertilizantes, para lo cual se consideraron las dosis de N aplicado en cada uno de los tratamientos. Se tuvo en cuenta un factor de conversión de 44/28 para pasar de N a N₂O (IPCC, 2006). Las emisiones evitadas por flujos de óxido nitroso debidas a fijación simbiótica de N de *A. acuminata* fueron calculadas a partir de la cantidad de N fijado por el cultivo (IPCC, 2006), considerando 180 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (Caru et al., 2000).

Las emisiones de N₂O se expresaron en kg.CO₂.eq.ha⁻¹, teniendo en cuenta un potencial de calentamiento global (PCG) de 310 (IPCC, 2006).

Los resultados de las variables por efecto de los tratamientos se sometieron a un análisis de varianza y cuando se presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos y la interacción se realizó la prueba de comparación de medias con el test de Tukey (p< 0.05) utilizando el paquete estadístico *Statistical Analysis System-SAS versión 9.0* (2002).

RESULTADOS

Forraje verde (FV) y materia seca (MS) de *P. clandestinum*

En el SSP se determinó que *P. clandestinum* produjo una cantidad similar de FV a la obtenida con 100 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (P>0.05) (tabla 1) y fue mayor a las obtenidas con 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹, que fueron iguales (P>0.05). Con 100, 150 y 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ se obtuvieron los valores más altos de MS, con 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ se obtuvo más alto FV (P<0.05) (tabla 1).

Tabla 1. Producción y calidad del pasto *P. clandestinum* por efecto del impacto de *A. acuminata* en SSP, dosis de N y edades de corte.

Corte (días)	SSP	0	50	100	150	200	Media
	kg.N.ha ⁻¹ .año						
Forraje verde FV t.ha⁻¹							
30	15	8	9	16.75	18	21.50	14.71B
45	23.60	8.12	14	24.90	29.50	32.00	22.67A
60	14	8.10	9.87	15.85	21.30	20.60	14.94B
Medias ¹	17.53c	19.37f	10.96d	19.17c	22.93b	24.70a	
Materia seca MS t.ha⁻¹							
30	3.2	1.97	2.53	3.57	3.53	4	3.13C
45	4.47	3	3.23	3.93	5.10	5.65	4.23A
60	4.03	2.17	2.47	4.47	4.47	5.03	3.61B
Medias	3.90c	2.38d	2.74d	4.37b	4.37b	4.89a	
Proteína cruda PC (%)							
30	15.13	7.93	9	18.85	19.50	19.75	15.03A
45	10.63	8.75	9.97	14.07	13.53	10.63	11.91B
60	11.25	12.47	12.50	11.90	11.33	11.25	11.92B
Medias	12.34b	9.72c	10.49c	14.94a	14.79a	15.45a	

¹Valores con distinta letra presentan diferencias estadísticas altamente significativas, prueba de Tukey P<0.05. Letras mayúsculas corresponde a los periodos de corte y letras minúsculas a los niveles de fertilización y el SSP.

En el SSP se obtuvo que la MS de *P. clandestinum* fue mayor a 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (P<0.05) (tabla 1), sin embargo, entre 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ no hubo diferencias (P>0.05); 100 y 150 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ superó en MS al SSP, 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (P<0.05). En la tabla 1 se observa que las dosis crecientes de N incrementaron la MS, con 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ se logró el valor más alto (P<0.05). A los 45 días se obtuvo la mayor cantidad de FV como de MS, sin diferencias a los 30 y 60 días para FV y mayor a los 60 que a los 30 días para MS (P<0.05).

Proteína cruda

El % PC de *P. clandestinum* aumentó a medida que el N incrementó de los 100 a 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹, 14.79, 14.94 y 15.45 %, sin diferencias entre sí (P>0.05) (tabla 1). En el SSP *P. clandestinum* superó en %PC (12.34 %) a 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (10.49 y 9.72 %) (P<0.05) (tabla 1), a su vez estos no mostraron diferencias (P>0.05). En la tabla 1 se

observa que mayor %PC se presentó a los 30 que a los 45 y 60 días (P<0.05).

N absorbido por el pasto kikuyo

En la figura 1 se observa que la cantidad de N absorbido por *P. clandestinum* en el SSP superó a 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ a los 30, 45 y 60 días (P<0.05), presentando un CV de 3 %, más bajo con respecto a las medias de las otras dosis de N, esto indica que la incorporación constante del N al suelo se mantuvo, aumentando la calidad de la pastura en el tiempo. También se observa que con 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ el N absorbido de *P. clandestinum* fue más alto comparado con las otras dosis de N y el SSP en todas las épocas de corte. Se determinó que no hubo una relación directamente proporcional entre los incrementos de N con el N absorbido por *P. clandestinum* y las épocas de corte, influyendo en la variabilidad de los datos estimados (figura 1).

Simulación de los flujos de las emisiones de N₂O a la atmósfera

Los flujos de las emisiones parciales y totales de N₂O en kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹ aumentaron con los incrementos de N (figura 2). Los flujos de las emisiones totales fueron mayores con 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (2154.5 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹) y menores

con 0 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (311.86 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹) (P<0.05). La diferencia en los flujos de las emisiones de N₂O entre el SSP y 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ indican reducciones en cerca de 1605.97 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹ a la atmosfera. El SSP generó flujos de emisiones de N₂O a la atmosfera similares a los de 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (P>0.05) (figura 2).

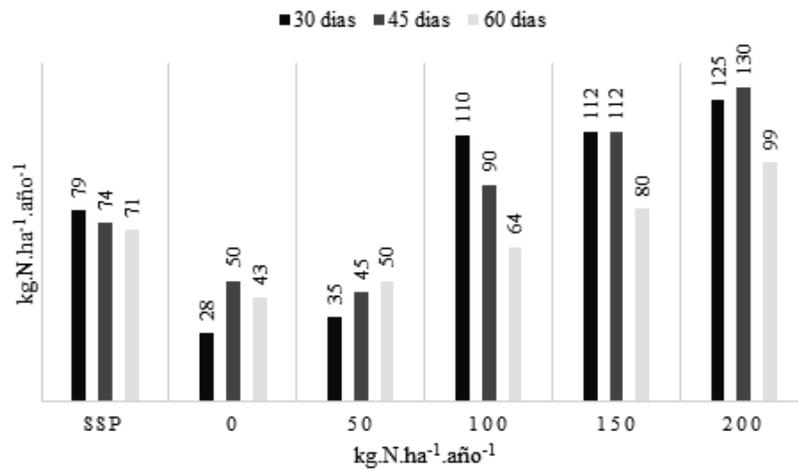


Figura 1. N absorbido de *P. clandestinum* por efecto del impacto de *A. acuminata*, dosis de N y épocas de corte. Medias y CV %: SSP (74.6 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ y 3 %), 0 (40.3 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ y 26 %), 50 (43.3 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ y 21 %), 100 (88.0 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ y 24 %), 150 (101.3 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ y 17 %), 200 (118.0 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ y 16 %).

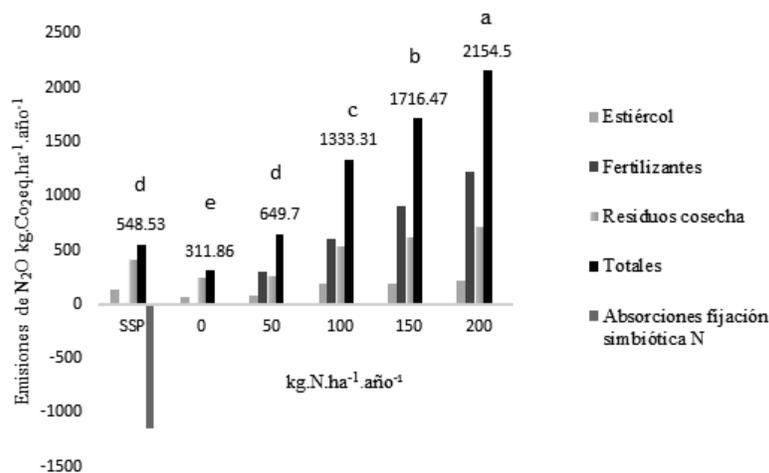


Figura 2. Flujos de las emisiones de N₂O a la atmósfera por efecto del impacto de *Aliso A. acuminata* en SSP con pasto kikuyo *P. clandestinum* y dosis de N. Valores con distinta letra presentan diferencias estadísticas altamente significativas, prueba de Tukey P<0.05.

DISCUSIÓN

Se presentó influencia positiva del SSP en la producción de FV del pasto *P. clandestinum* que superó a 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año, más alto al encontrado por Builes & Gómez (2004), en pasto kikuyo *P. clandestinum* en arreglo silvopastoril con Aliso *A. acuminata*, con una producción de FV de 5.41 t.ha⁻¹corte⁻¹.

La respuesta positiva de aumentos de FV de *P. clandestinum* asociado con *A. acuminata* puede ser explicada por lo expuesto por Molina *et al.* (2008), el FV del pasto presentó una alta correlación ($r=0.83$) con el crecimiento en altura de *A. acuminata* de 2.5 años de edad con una densidad de 1200 árboles ha⁻¹, debido a una alta fijación de N fijado (188 kg.N.ha⁻¹), ya que las raíces de Aliso hacen simbiosis radical con actinomicetos del género *Frankia* (Caru *et al.*, 2000).

A mayores dosis de N la tendencia fue a aumentos en la cantidad de FV. Según Mejía *et al.* (2014), los incrementos de N hasta 50 kg.N.ha⁻¹.año con fertilizante sólido, incrementaron la producción de FV de *P. clandestinum* hasta 9.59 t.FV.ha⁻¹.corte⁻¹, y superó al testigo en 167 % (3.65 t.FV.ha⁻¹.corte⁻¹), valores que fueron inferiores a los reportados con esta misma dosis.

Se comprobó el efecto positivo de las dosis crecientes de N en los aumentos de MS de *P. clandestinum*. Al respecto, Mejía *et al.* (2014) reportaron que la producción de MS incremento con cada 10 kg.N.ha⁻¹ adicionado tanto en fertilizante sólido como líquido, con la dosis más alta de 50 kg.N.ha⁻¹ se alcanzaron valores de 1.91 y 1.63 t.MS.ha⁻¹ respectivamente, inferiores a los reportados en este estudio con la misma dosis y a los de Lotero (1995). Apráez & Moncayo (2003) reportaron que el tratamiento sin fertilizante produjo 21 % de MS, mientras que el tratamiento con fertilizante 15.2 %.

En el SSP la producción de MS superó a las dosis de 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹. De igual forma, Builes & Gómez (2004) y Reis *et al.* (2009), mencionan

un mejoramiento en la calidad de *P. clandestinum* cuando estuvo asociados con árboles, debido a más bajo contenido en fibra y a mayor contenido en proteína cruda (Beer, 1980).

A diferencia de los estudios realizados por Gualdrón & Padilla (2008) y Insuasty *et al.* (2011) quienes encontraron que la producción de MS de *P. clandestinum* fue más alta sin la influencia de *A. acuminata*.

El %PC se redujo con la edad del pasto *P. clandestinum*. De manera similar, Naranjo (2002) encontró que el %PC de *P. clandestinum* se redujo al recolectar muestras de pasto cada 7 días entre los 21 y 63 días después del rebrote; debido a que la acumulación de N en los órganos vegetativos es alta durante las primeras etapas de crecimiento de los cultivos y disminuye con la senescencia (Reeves *et al.*, 1996; Soto *et al.*, 2005).

El N absorbido por *P. clandestinum* fue más alto con la influencia de *A. acuminata* en el SSP comparado con 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹, debido a que una característica de los árboles fijadores de nitrógeno (AFN) es la de fijar nitrógeno (N) atmosférico en sus nódulos radicales y, a través del metabolismo, almacenarlo en su componente forrajero (hojas, peciolos, tallos tiernos y frutos) en forma de proteína cruda (N x 6.25), cuyo contenido varía entre 10 a 35 %. Se incluyen especies como *Alnus*, que sin ser leguminosas, fijan nitrógeno atmosférico (Read *et al.*, 1976; Beer, 1980).

Los mayores aportes a los flujos de las emisiones totales de N₂O fueron debidos a fertilizantes nitrogenados, que aumentaron conforme se incrementaron las dosis de N (figura 2). Según Tarre *et al.* (2001) los fertilizantes nitrogenados son los mayores causantes de aumentos en los flujos de las emisiones debidas a N₂O. La nitrificación y desnitrificación son los principales procesos responsables por las emisiones del suelo (IPCC, 2006).

Naranjo *et al.* (2012) para pasturas mejoradas PM y 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ reportaron flujos de emisiones totales de 876.9 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹. En

ambos estudios, en los SSP no se reportaron flujos de emisiones de N₂O por el uso de fertilizantes nitrogenados. Los SSP minimizan el uso de fertilizantes en las pasturas (Smith *et al.*, 2008).

El SSP en este estudio generó flujos de emisiones evitadas de N₂O (absorciones de CO₂) por el proceso de fijación simbiótica de N correspondiente a -1141.78 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹ (figura 2). Tarre *et al.* (2001) mencionan que los SSP tienen la propiedad de neutralizar los flujos de las emisiones de GEI a la atmósfera.

Van Kernebeek & Gerber (2008) contabilizaron 13420 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹ debido a flujos totales de N₂O, derivadas del manejo de estiércoles, fertilización nitrogenada, residuos de cosecha y de cultivos fijadores de nitrógeno en una explotación ganadera en la India, mayores a los simulados en este estudio con 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹, 2154.5 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹ (figura 2). Según Naranjo *et al.*, (2012), conforme se aumentó la carga animal (UGG ha⁻¹) de sistemas extensivos de praderas degradadas a sistemas silvopastoriles intensivos SSPi, los flujos de las emisiones de N₂O debidas a heces y orinas también aumentaron pasando de 355.2 a 1230 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹. Según Parra-Silva (2015), los flujos de las emisiones totales en sistemas ganaderos de una zona andina de Nariño, se vieron influenciados por la carga animal por hectárea.

De acuerdo con el IPCC (2006), las actividades agropecuarias tienen gran influencia en las emisiones de N₂O para la atmósfera, mencionan que el total de N excretado por Unidad Animal (UA) en Suramérica, se estima en 162 g.N.día⁻¹, valor más bajo al obtenido con 200 kg.N.ha⁻¹.año⁻¹ (235.01 g.N.día⁻¹). Los estudios de De Klein & Eckard (2008) confirman que con la adición de taninos en la dieta de los bovinos se mejora la retención de N por el animal y se pueden reducir las emisiones de N₂O en los estiércoles. El *A. acuminata* es muy rico en taninos (hasta en un 20 %).

En los últimos 250 años la concentración de N₂O ha aumentado cerca de 16 %, de 270 para

320 ppbv (partes por billón en volumen), o a una tasa de 0.8 ppbv.año⁻¹ (IPCC, 2007). Los aumentos en las emisiones de N₂O por el uso de N en fertilizantes, para sustentar una mayor carga animal de bovinos pueden ser compensadas por grandes cantidades de carbono atmosférico fijado en el suelo por los SSP y/o en los procesos de fijación simbiótica de N, que se consolidan como probables alternativas de producción ganadera mitigadoras de efecto invernadero (Soussana *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Se pudo establecer que en el SSP la incorporación de Aliso *A. acuminata* mejora la calidad y el N absorbido del pasto *P. clandestinum* comparado con 0 y 50 kg.N.ha⁻¹.año, pudiendo sustituir en parte la fertilización con 100 kg.N.ha⁻¹.año.

El SSP tiene la capacidad de mitigación de GEI (absorciones-flujos GEI) de 593.25 kg.CO₂eq.ha⁻¹.año⁻¹ a la atmósfera, debido a la fijación simbiótica de N, enfrentando así de mejor manera los efectos negativos del cambio climático global.

Se recomienda el sistema silvopastoril de *A. acuminata* y pasto kikuyo *P. clandestinum* para las zonas ganaderas del trópico alto de Colombia, como una alternativa de producción importante que minimiza el uso de fertilizantes nitrogenados y las emisiones de GEI a la atmósfera sin alterar la calidad del pasto kikuyo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Association of Official Agricultural Chemists (AOAC).** (1975). *Official Methods of Analysis*. 12th ed. Washington, D.C.: Association of Analytical Chemists International.
- Apráez, E., & Moncayo, O.** (2003). Caracterización agronómica y bromatológica de una pradera de kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hoechst) sometida a rehabilitación mediante labranza y fertilización orgánica y/o mineral. *LEAD*, 10, 25-35.
- Becerra, A., Zak, M.R., Horton, T., & Micolini, J.** (2005). Ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal colonization of *Alnus acuminata* from Calilegua National Park (Argentina). *Mycorrhiza*, 15, 525-531. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-005-0360-7>
- Beer, J.** (1980). *Alnus acuminata* con pasto. En *Curso sobre técnicas agroforestales para el trópico húmedo*. Catie: Turrialba, Costa Rica. 6 p.
- Bhatia, A., Pathak, H., & Aggarwal, P.K.** (2004). Inventory of methane and nitrous oxide emissions from agricultural soils of India and their global warming potential. *Current Science*, 87(3), 317-324.
- Bolan, N.S., Saggiar, S., Luo, J., Bhandral, R., & Singh, J.** (2004). Gaseous emissions of nitrogen from grazed pastures: processes, measurements and modelling, environmental implications, and mitigation. *Advances in Agronomy*, 84, 37-120. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)84002-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)84002-1)
- Builes, A., & Gómez, M.** (2004). Evaluación de la producción y calidad de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) asociado con árboles de aliso (*Alnus acuminata*) en bmh-MB (Trabajo de pregrado). Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Caru, M., Becerra, A., Sepúlveda, D., & Cabello, A.** (2000). Isolation of infective and effective Frankia strains from root nodules of *Alnus acuminata* (Betulaceae). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 16, 647-651. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008929520571>
- Correa, H.J.** (2003). Simulación del metabolismo del nitrógeno en vacas lactantes. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 16(3), 220-227.
- De Klein, C.A.M., & Eckard, R.J.** (2008). Targeted technologies for nitrous oxide abatement from animal agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48, 14-20. DOI: <https://doi.org/10.1071/EA07217>
- Gualdron, E., & Padilla, C.** (2008). Producción y calidad de leche en vacas Holstein en dos arreglos silvopastoriles de acacia y aliso asociadas con pasto kikuyo. *Revista de Zootecnia*, 1, 63-76.
- Hansen, M. C., Stehman, S. V., & Potapov, P. V.** (2010). Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America*, 107, 8650-8655. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0912668107>
- Holdridge, L.** (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 105, 367-368. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.105.2727.367>
- Insuasty, E., Apraéz, J.E., & Navia, J.F.** (2011). Efecto del arreglo silvopastoril aliso (*Alnus Acuminata* K.) y kikuyo (*Pennisetum clandestinum* H.) sobre el comportamiento productivo en novillas Holstein en el Altiplano del departamento de Nariño. *Agroforesteria Neotropical*, 1(1), 29-36.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).** (2004). Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Nariño. Bogotá: IGAC. CD-ROM.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** (2006). *Agriculture, Forestry and Other Land Use*. En H.S. Eggleston, L. Buendía, L.K. Miwa, T. Ngara & K. Tanabe (eds). Hayama, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japón: The Intergovernmental Panel on Climate Change. Institute for Global Environmental Strategies (Iges). 595p.
- IPCC.** (2007). *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lotero, J.** (1995). Fertilización de pastos. En: Vallejo, G., & Osorio, W. (eds) Seminario sobre fertilización de cultivos. Medellín: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCSC). 1-17 p.

- Mahecha, L.** (2002). El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 226-231.
- Mejia-Taborda, A.C., Ochoa-Ochoa, R., & Medina-Sierra, M.** (2014). Efecto de diferentes dosis de fertilizante compuesto en la calidad del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. Ex Chiov.). *Pastos y Forrajes*, 37(1), 31-37.
- Molina, M., Medina, M., & Mahecha, L.** (2008). Microorganismos y micronutrientes en el crecimiento y desarrollo del Aliso (*Alnus acuminata* H.B.K.) en un sistema silvopastoril alto andino. *Livestock Research for Rural Development*, 20(54).
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., & Solorio, B.** (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 10, 1654-1663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>
- Naranjo, H.** (2002). Evaluación nutricional del pasto kikuyo a diferentes edades de corte. *Despertar Lechero*, 20, 150-167.
- Naranjo, J.F., Cuartas, C.A., Murgueitio, E., Chará, J., & Barahona, R.** (2012). Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock Research for Rural Development*, 24 (150).
- Parra-Silva, A.** (2015). Greenhouse gas balance in the conversion from extensive pasture to other agricultural systems in Andean region of Colombia (Tesis de PhD). Jaboticabal, Brasil: UNESP, Department of Exact Sciences. 49 p.
- Phongpan, S., & Mosier, A.R.** (2003). Effect of crop residue management on nitrogen dynamics and balance in a lowland rice cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 66, 133-142. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024475229663>
- Pattey, E., Trzcinski, M., & Desjardins, R.** (2005). Quantifying the reduction of greenhouse gas emissions as a result of composting dairy and beef cattle manure. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 72, 173-187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-005-1268-5>
- Razz, R., & Clavero, T.** (2006). *Cambios en las características químicas de suelos en un banco de Leucaena leucocephala* y en un monocultivo de *Brachiaria brizantha*. *Revista de la Facultad de Agronomía LUZ*, 23, 326-331.
- Read, D. J., Koucheki, H.K., & Hodgson, J.** (1976). Vesicular-arbuscular mycorrhiza in natural vegetation systems. I. The occurrence of infection. *New Phytologist*, 77, 641-653. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1976.tb04657.x>
- Reeves, M., Fulkerson, W.J., & Kellaway, R.C.** (1996). Forage quality of kikuyu (*Pennisetum clandestinum*): the effect of time of defoliation and nitrogen fertiliser application and in comparison with perennial ryegrass (*Lolium perenne*) Australian. *Journal of Agricultural Research*, 47(8), 1349-1359. DOI: <https://doi.org/10.1071/AR9961349>
- Reis, G., Lana, Â., Mauricio, R., Lana, R., Machado, R., Borges, I., & Neto, T.** (2009). Influence of trees on soil nutrient pools in a silvopastoral system in the Brazilian Savannah. *Plant and Soil*, 329, 185-193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0144-5>
- SAS Institute Inc.** (2002). SAS User's Guide: SAS STAT Version 9. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Smith, P., Martino, D., Zcong, C., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., Mccarl, B., Ogle, S., O'mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., Mcallister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U., Towpra-Yoon, S., Wattenbach, M., & Smith, J.** (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological*, 363, 789-813. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>
- Soto, C., Valencia, A., Galvis, R.D., & Correa, H.J.** (2005). Efecto de la edad de corte y del nivel de fertilización nitrogenada sobre el valor energético y proteico del pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(1), 17-26.
- Soussana, J.F., Tallec, T., & Blanford, V.** (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4, 334-350. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731109990784>
- Staley, T., Gonzalez, J., & Neel, J.** (2008). Conversion of deciduous forest to silvopasture produces soil

properties indicative of rapid transition to improved pasture. *Agroforestry Systems*, 74, 267-277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9139-0>

Tarre, R., Macedo, R., Cantarutti, R.de. P., Rezend, C., Pereira, J., Ferreira, E., Alves, B., Urquiaga, S., & Boddey, R. (2001). The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. *Plant and Soil*, 234, 15-26. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010533721740>

Teitzel, J.K., Gilbert, M.A., & Cowan, R.T. (1991). Sustaining productive pastures in the tropics. Nitrogen

fertilized grass pastures. *Tropical Grasslands*, 25, 111-118.

Van-Kernebeek, H., & Gerber, P. (2008). Environmental life cycle analysis of milk production in Ropar, India. India: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 34 p.

Zapata, B.G., Bautista, Z.F., & Asfier, C.M. (2009). Caracterización forrajera de un sistema silvopastoril de vegetación secundaria con base en la aptitud de suelo. *Técnica Pecuaria en México*, 47(3), 257-270.



CRECIMIENTO PLANTULAR EN CONDICIONES DE INVERNADERO DE LA ESPECIE FORESTAL *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith

Seedling growth in greenhouse conditions of the forest species *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith

Georgina Vargas-Simón¹, Reinaldo Pire² & Martha Lázaro Dzul³

Vargas-Simón, G., Pire, R., & Lázaro-Dzul, M. (2018). Crecimiento plantular en condiciones de invernadero de la especie forestal *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith. *Colombia Forestal*, 21(1), 58-68

Recepción: 9 de febrero de 2017

Aprobación: 28 de agosto de 2017

Resumen

Dialium guianense es una especie tropical arbórea de bosques perennifolios utilizada por su madera y frutos comestibles. Estos ecosistemas son amenazados, por lo que el objetivo del estudio fue evaluar el crecimiento inicial de la planta con miras a establecer programas de propagación. Las plántulas fueron cultivadas en bolsas de vivero y se empleó un diseño completamente aleatorio con una población inicial de 200 plantas durante 10 meses. El tallo y la raíz alcanzaron longitudes de 32.8 y 28.9 cm, respectivamente. El número de hojas compuestas fue de 12.3 con siete folíolos. La acumulación de biomasa fue de 2.5 g en el tallo, 1.6 g en la raíz y 3.7 g en las hojas. La relación vástago/raíz mostró, aproximadamente, cuatro veces mayor biomasa en el vástago. La TRC media fue de 15 mg g⁻¹ día⁻¹. El crecimiento de *D. guianense* resultó lento, indicando que es una especie tardía sucesionalmente.

Palabras clave: biomasa, propagación de plantas, relación vástago/raíz, tasa relativa de crecimiento.

Abstract

Dialium guianense is used for its wood and fruit production, and is a tropical tree species native to evergreen forests. Given the threat these forests face, the purpose of this work was to evaluate the initial growth of the plant under greenhouse conditions, for aiming in the development of propagation programs. Seedlings of the species were transplanted to nursery bags under a completely randomized design and grown for 10 months with an initial population of 200 plants. At the end of the experiment, the shoot and root reached lengths of 32.8 and 28.9 cm, respectively. The average number of composite leaves was 12.3 each with seven leaflets. The average biomass was 2.5 g for the shoot, 1.6 g for roots, and 3.7 g for leaves, with a shoot/root around four. The average relative growth rate (RGR) was 15 mg g⁻¹ day⁻¹. These characteristics indicate that *D. guianense* is a late successional species.

Keywords: biomass, plant propagation, relative growth rate, shoot/root ratio

1 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. georgina.vargas@ujat.mx. Autor para correspondencia.

2 Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Barquisimeto, Venezuela. rpire@ucla.edu.ve

3 Colegio de Postgraduados. Montecillo. Estado de México, México. marodzul@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

D. guianense (Aubl.) Sandwith es una especie arbórea de la familia Fabaceae, subfamilia Caesalpinioideae que tiene una destacada importancia ecológica como especie primaria codominante de los bosques perennifolios de *Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell, *Calophyllum brasiliense* Cambess. y *Guatteria anomala* R.E. Fr. Se encuentra distribuida desde México hasta la Amazonía brasileña Pennington & Sarukhán (2005), Herrero-Jáuregui et al. (2009) y Wittmann et al. (2013) la ubican en una distribución paleotropical. En la amazonía peruana se encuentra como árbol de sombra del cacao (Vebrova et al., 2014). En México, es una especie restringida a la vertiente del golfo de México. Crece en zonas de topografía ondulada con suelos profundos, lateríticos o derivados de margas calcáreas, arcillosos y de drenaje deficiente. Su amplitud altitudinal va desde el nivel del mar hasta 400 m (Pennington & Sarukhán, 2005).

El principal producto de *D. guianense* es la madera, la cual se utiliza para leña y carbón, durmientes, en construcciones pesadas y marinas, en vigas, postes y mangos para herramientas e implementos agrícolas; la pulpa, semejante a la del tamarindo (*Tamarindus indica* L.), se utiliza para consumirse en fresco y en la elaboración de bebidas refrescantes (Cordero & Boshier, 2003; Herrero-Jáuregui et al., 2009). Así mismo, los frutos son parte de la dieta de monos (Zárate et al., 2014).

A pesar de la gran importancia de las especies que componen los bosques húmedos, en los últimos años estas áreas han sufrido una considerable reducción debido a las diferentes actividades antropogénicas como el establecimiento de la ganadería, explotación petrolera y sistemas de producción importados, las cuales han traído como consecuencia la disminución de especies como es el caso de *D. guianense*, provocando que esta se remita a relictos de selva o se le encuentre como árboles aislados (Ramírez, 2004).

D. guianense es un árbol de hasta 45 m de altura y hasta 1.5 m de diámetro normal; los frutos son

vainas de 1 a 2.2 cm de largo, globosas u ovoides, indehiscentes, con pericarpio frágil, pubescentes de color parduzco y mesocarpio agridulce; contiene una (o dos) semilla reniforme, comprimida, de 5 a 9 mm de largo (Vargas-Simón et al., 2003). Los estudios sobre esta especie son escasos y la mayoría se remiten a su distribución y ecología; solamente existen datos de crecimiento de una especie homóloga nativa de África, *Dialium guineense* Willd.

Por ser una especie ecológicamente importante, así como valiosa por sus características maderables, el objetivo de este trabajo fue evaluar su crecimiento inicial en condiciones de invernadero, cuyos resultados pueden servir para la implementación de programas de propagación masiva de la especie.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona, colecta de semillas y germinación

Los frutos maduros se colectaron en Huimanguillo, Tabasco, México (17°49'24.70" latitud norte-93°24'55.94" longitud oeste) en una elevación de 34 m de altitud, esta es una zona caracterizada por tener un clima cálido húmedo. La temperatura media es de 27 °C, con valores máximos de 36 °C en verano y mínimos de 18.5 °C en el invierno. Las lluvias son abundantes en el verano, con una precipitación promedio de 2500 mm anuales (Semarnat & Conafor, 2014).

Las semillas fueron escarificadas mecánicamente por 10 s con lija de papel C-99, 80 SIC de acuerdo con la técnica propuesta por Vargas-Simón et al. (2003) e inmediatamente puestas a germinar en charolas de plástico de 38 celdas, utilizándose arena esterilizada como sustrato.

Trabajo en invernadero

Una vez que las plántulas tenían 25 días de germinadas y su par de paracotiledones totalmente

extendidos, se trasplantaron a bolsas de vivero (30 cm de largo x 21 cm de ancho). El sustrato utilizado consistió en una mezcla de tierra negra, tierra de cacao y germinaza (1:1:1 v/v), previamente desinfectado con Interceptán (2 gL⁻¹). Se dispuso de un total de 200 plantas en igual número de bolsas. Mensualmente se tomaban 10 plantas al azar y se sacrificaban para la evaluación. Esto se repitió durante 10 meses durante los cuales se utilizó un total de 100 plantas. Treinta días después del trasplante (ddt) se iniciaron las evaluaciones del crecimiento vegetativo durante un período de 10 meses a intervalos mensuales, para lo cual se seleccionaron 10 plantas sanas y de tamaño uniforme. El riego se aplicó cada tercer día. El experimento se estableció bajo condiciones de invernadero en la División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (17°59'71" latitud norte-92°58'16" longitud oeste). Los valores promedios de temperatura y humedad dentro de la estructura registrados fueron Tmax = 40.6°C ± 2.7, Tmin = 24.3°C ± 0.8, HR = 95.9 % ± 2.4. Dentro del invernadero, en días despejados, la radiación fotosintéticamente activa promedio fue de 21.8, 117.3 y 133.0 μmol m⁻² s⁻¹ a las 9:30, 12:00 y 15:00 horas, respectivamente.

Medición de variables

Se evaluó la longitud de tallo (LT) y longitud de raíz principal (LR), así como el número de hojas compuestas (NH). Adicionalmente, se midió el diámetro de la base del tallo a los 10 meses después del trasplante; para este momento fue 3.49 ± 0.39 mm. Además, se obtuvo la acumulación de biomasa por órgano, la tasa relativa de crecimiento (TRC) y la relación raíz/vástago. Para obtener la biomasa, cada órgano vegetativo (raíz, tallo y hojas) fue colocado en bolsas de papel estraza y se mantuvieron en la estufa a temperatura constante por 48 h a 70°C. Los pesos se obtuvieron mediante una balanza analítica Ohaus (precisión 0.1 g). La tasa relativa de crecimiento (TRC) se obtuvo según la fórmula de [Hunt \(1982\)](#).

$$TRC = \frac{\ln PS_2 - \ln PS_1}{t_2 - t_1}$$

Donde:

lnPS₂: corresponde al logaritmo de peso seco 2.

lnPS₁: corresponde al logaritmo de peso seco 1.

t₂ y t₁: corresponden a tiempo 2 y 1, respectivamente.

Análisis de datos

El estudio consistió en un ensayo de muestreos con un diseño completamente al azar donde cada muestra estuvo constituida por 10 repeticiones. Los resultados se presentan en forma gráfica incluyendo los valores promedio y su dispersión (barras de error) durante todo el período del ensayo. Adicionalmente, se desarrollaron las ecuaciones de regresión que representan el crecimiento de la biomasa del tallo, raíz y hojas de la planta durante el período total de 300 días después del trasplante. Los cálculos se realizaron utilizando el programa CoStat 6.4 (CoHort Software, Monterey, CA, EE. UU.).

RESULTADOS

Germinación y crecimiento de tallo, raíz y hojas

El estudio de crecimiento de las plántulas de *D. guianense* se inició a partir de la germinación de las semillas, la cual ocurrió al tercer día después de la siembra con la salida de la radícula. La emergencia de los cotiledones de almacenamiento, luego de la germinación epigea fanerocotilar, se produjo al séptimo día después de la siembra y los paracotiledones emergieron al décimo.

Al final del periodo de estudio, la LT promedio fue de 32.8 cm, sobrepasando la longitud de la raíz. Esta presentó un aumento gradual a través del periodo de estudio y midió 11.2 cm en la primera evaluación (30 ddt) hasta alcanzar una longitud final promedio de 28.9 cm (300 ddt). Cabe resaltar que, a pesar de ser una leguminosa, no se observó nodulación en raíces. El número de hojas

compuestas promedio fue de 12.3 (figura 1), las cuales se caracterizan por ser imparipinnadas con siete folíolos, ovados con ápice largamente acuminado. El número de folíolos fue variable en esta etapa de crecimiento: a los 30 ddt se formaron los primeros eófilos simples y los trifolíolados, mientras que a los 150 ddt emergieron los metáfilos pentafolíolados, con una filotaxia en espiral.

Acumulación de biomasa

La acumulación de biomasa por planta al final de la evaluación fue de 3.72 g en las hojas, 2.53 g en el tallo y 1.62 g en las raíces (figura 2). En todos los casos el modelo de regresión explicó casi totalmente la variación en función del tiempo ($r^2 = 0.995, 0.987$ y 0.990 , respectivamente).

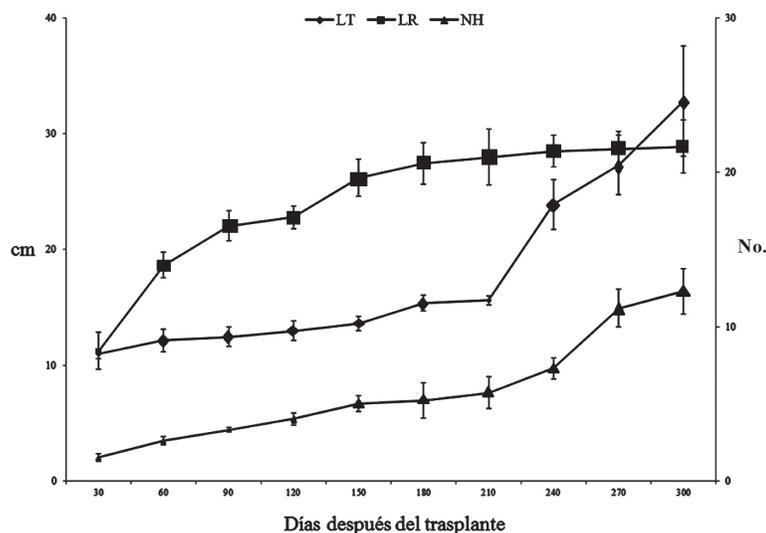


Figura 1. Longitud de tallo (LT), longitud de raíz (LR) y número de hojas (NH) de plántulas de *D. guianense* 300 días después del trasplante. Las barras verticales señalan el error estándar de cada media y cuando no son visibles indica que son más pequeñas que el marcador correspondiente.

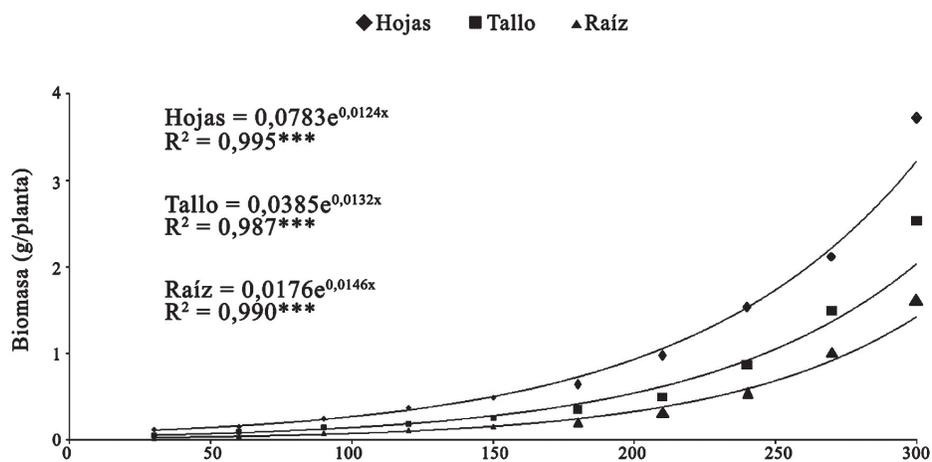


Figura 2. Acumulación de biomasa en hojas, tallo y raíz de *D. guianense* 300 días después del trasplante; n=100. *** $P \leq 0.001$.

Tasa relativa de crecimiento (TRC)

La máxima TRC de la planta completa o TRC total se obtuvo a los 60 ddt con un valor promedio de $18.5 \text{ mg g}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Al final del experimento fue de $15.5 \text{ mg g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (figura 3).

Relación raíz/vástago

Referente a la relación raíz/vástago (R/V), se obtuvo un valor promedio final de 0.21, el cual indica que las plantas de *D. guianense* asignaron en este período de tiempo casi cinco veces más biomasa al vástago que a las raíces (figura 4).

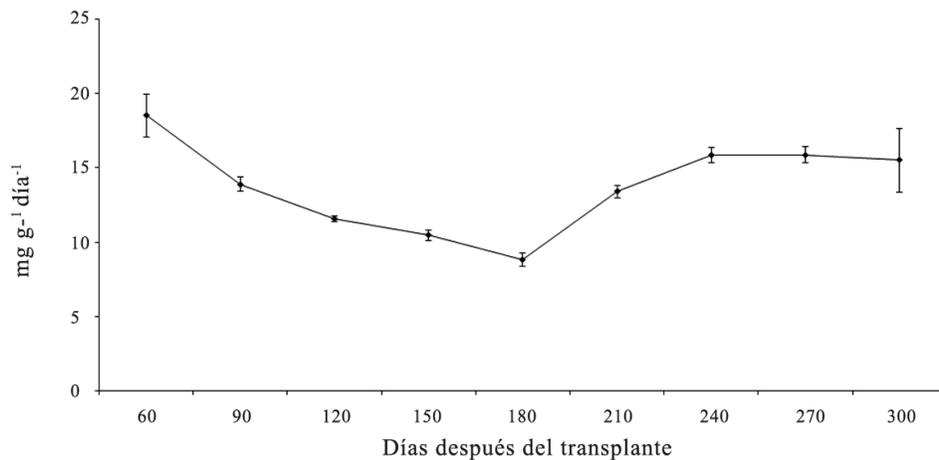


Figura 3. Tasa relativa de crecimiento (TRC) de plantas de *D. guianense* 300 días después del trasplante. Las barras verticales señalan el error estándar de cada media y cuando no son visibles indica que son más pequeñas que el marcador correspondiente.

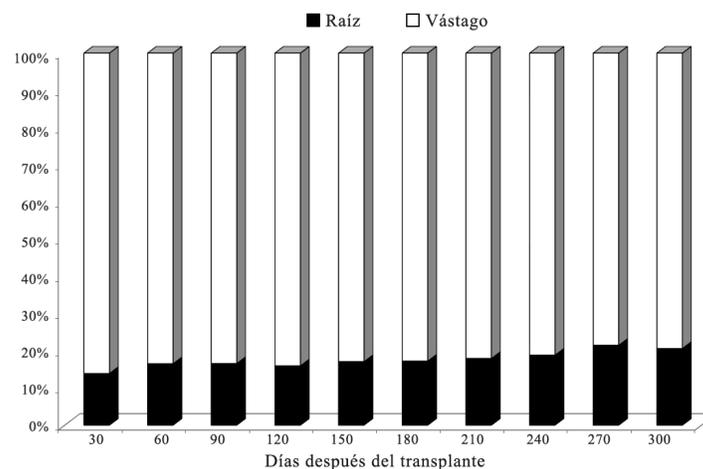


Figura 4. Redistribución de biomasa (%) en plantas de *D. guianense* entre la raíz y el vástago 300 días después del trasplante.

DISCUSIÓN

Germinación y crecimiento de tallo, raíz y hojas

En nuestro estudio la germinación se inició a los tres días después de la siembra luego de la escarificación mecánica, lo cual guarda semejanza con el tiempo requerido por la especie *Dialium corbisieri* Staner, el cual fue de cuatro días (Beaune *et al.*, 2013). Sautu *et al.* (2006) reportaron que, sin escarificación, el tiempo medio de germinación fue de 32.5 días en condiciones de vivero para *D. guianense*; mientras que, en campo, se ha observado una germinación de solo 12.5 % en 64 días. Lo anterior indica que la especie requiere la utilización de un tratamiento pregerminativo como la escarificación mecánica para promover una rapidez en el proceso. Hartmann *et al.* (2002) confirman las ventajas de este tratamiento pregerminativo en cuanto a la ganancia en tiempo y homogeneización de la germinación.

La máxima longitud alcanzada por el tallo de la planta al final del estudio (32.8 cm) indica que *D. guianense* tiene un crecimiento lento, a pesar de que es una especie codominante en la selva perennifolia (Boege & Dirzo, 2004). Comparando con especies caesalpinoideas de crecimiento más rápido que *Dialium*, Santos & Buckeridge (2004) en *Hymenaea courbaril* L. reportaron 35 cm de longitud de tallo a los 50 días de edad; mientras que en *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Caesalpinoideae) Alves *et al.* (2013) señalaron 9.3 cm de tallo a los 14 días. En condiciones de campo, Boege & Dirzo (2004) registraron un crecimiento promedio del tallo en *D. guianense* de solo 3.4 cm en 174 días mientras que Jiménez *et al.* (2002) señalan que se requieren entre 5 y 7 meses para obtener una altura de 40 cm. Román-Dañobeytia *et al.* (2012) mostraron que *D. guianense* en 18 meses después del trasplante alcanza una longitud y un diámetro basal menor a 1 m y 1.5 cm, respectivamente. Datos similares se registraron en otras especies consideradas tardías sucesionalmente

como *Brosimum alicastrum* Sw. y *Ampelocera hottlei* (Standl.) Standl.; especies que se caracterizan por ser tolerantes a la sombra y de lento crecimiento (Román-Dañobeytia *et al.*, 2012). En el mismo estudio, las especies pioneras, *Muntingia calabura* L., *Acacia angustissima* (Mill.) Kuntze y *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb., de crecimiento rápido, alcanzan alturas de 2.5 m y 4 cm de diámetro basal, particularmente heliófilas (Román-Dañobeytia *et al.*, 2012). Resultados similares de la respuesta al crecimiento entre especies pioneras y tardías sucesionalmente se muestra en Rolim & Chiarello (2004) y en Román-Dañobeytia *et al.* (2007).

Investigaciones sobre *D. guineense* han reportado longitudes del tallo de 10.4 cm a 90 después del trasplante (Olajide *et al.*, 2014) y de 9 cm a 177 días (Orhue, 1997) para la misma especie africana.

Las plantas se vieron afectadas por una infección fúngica, sin la cual probablemente el crecimiento del tallo pudo haber sido mayor. La longitud de tallo es una de las variables comúnmente usada en viveros para estimar el momento en el que las plantas son adecuadas para ser transportadas a sitios en reforestación (Conafor & Semarnat, 2005), lo cual se relaciona con su capacidad fotosintética y superficie de transpiración. Las plantas más altas pueden competir ventajosamente con otras especies vegetales en sus cercanías (Quiroz *et al.*, 2009).

La longitud de la raíz presentó un incremento superior a dos veces y media entre la primera (30 ddt) y última medición (300 ddt). Valores similares en esta variable registra Alves *et al.* (2011) para *P. dubium*, cuya longitud radicular osciló entre 8.9 a 12.5 cm a los 14 días de edad y *Piscidia piscipula* L. Sarg. (Papilionoideae), la cual registra una longitud de raíz de 18.7 cm en promedio a los cuatro meses después del trasplante (Luna-Flores *et al.*, 2012).

Es de destacar que a partir de los 270 ddt, las raíces iniciaron la formación de un enroscamiento por la limitación de espacio, por lo que el crecimiento en esta última etapa prácticamente se detuvo y lo cual obligó a decretar la finalización del ensayo en la medición siguiente. Una situación

similar se presentó en un estudio previo con plantas de *Inga jinicuil* Schdt. (Vargas-Simón & Pire, 2009). La longitud de la raíz es un parámetro que ha mostrado ser un buen predictor de la absorción de agua y nutrientes, aunque su funcionamiento global puede variar entre diferentes raíces y a lo largo de una raíz individual de acuerdo con su edad (Hodge et al., 2009). En las etapas posteriores a la germinación, la raíz tiende a incrementar su tasa de crecimiento, lo cual permite que la plántula se establezca en el sustrato (Azcón-Bieto & Talón, 2008; Hodge et al., 2009).

Por otra parte, y con relación a la ausencia de nódulos fijadores de nitrógeno, este es un detalle que ya había sido reportado por Orhue (1997) en plantas de *D. guineense*.

Correspondiente a la formación de hojas, a mitad del período de evaluación se habían producido cinco hojas por planta, valor comparativo con las siete hojas por planta registrados por Orhue (1997) para *D. guineense* en similar período de tiempo. En el desarrollo plantular de esta especie destacó la heterofilia, es decir, se fueron desarrollando un número diferente de folíolos. El número final corresponde a las hojas adultas según la descripción de Pennington & Sarukhán (2005). La heterofilia es característica de las leguminosas y otras familias botánicas (Kidner & Umbreen, 2010; Vozzo, 2010; Alves et al., 2013). Las variantes morfológicas de las hojas están genéticamente programadas, y aunque su función aún no es clara, se menciona que se debe primordialmente a la competencia por luz. Esto sucede sobre todo en las etapas juveniles y, estructuralmente, está relacionado con la filotaxia y la longitud del pecíolo (Kidner & Umbreen, 2010).

Acumulación de biomasa

La acumulación de biomasa de 7.87 g por planta durante 300 ddt en *D. guianense* puede considerarse baja si se compara con otras leguminosas tal como *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake; una especie de rápido crecimiento que puede

alcanzar hasta 9 g en tallo y cerca de 4 g en raíces en solo 90 días después del trasplante (De Souza et al., 2012). Datos equivalentes a los registrados en este estudio se observan en *Mimosa caesalpiniae-folia* Benth y *M. hostilis* Benth, de 6.1 y 6.2 g planta⁻¹, respectivamente, aunque el estudio de Araújo & Costa (2013) fue de un tiempo menor (90 días). La acumulación de biomasa está relacionada con la cantidad de tejido producido y depende de las actividades de los meristemos, elongación de las células, eficiencia fotosintética y biosíntesis de paredes secundarias, además de los factores ambientales (Demura & Ye, 2010).

Tasa relativa de crecimiento total (TRC total)

La máxima TRC obtenida para la planta completa de *D. guianense* fue menor a la TRC de 92 mg g⁻¹ d⁻¹ registrada por Santos & Buckeridge (2004) para plantas de *H. courbaril* de edad similar, lo cual demuestra el papel preponderante del factor genético sobre esta variable (Villar et al., 2008). La disminución drástica en la TRC total observada en la quinta evaluación (figura 3), es atribuida a la infección fúngica sufrida por las plantas que provocó cierto grado de defoliación y, por consiguiente, una reducción en el crecimiento de toda la planta. Boege & Dirzo (2004) mencionan que la característica de bajas tasas de crecimiento en las plantas puede estar determinada por una respuesta adaptativa a una posible baja disponibilidad de recursos; pero también porque es un árbol cuya madera tiene una alta densidad, 1.02 g cm⁻³ (Flores-Vindas & Obando-Vargas, 2003). King et al. (2006), muestran una relación indirectamente proporcional entre la tasa de crecimiento relativa y la densidad de madera en algunas especies tropicales, entre ellas *Dialium indum* L. cuya tasa promedio es de 2.27 mm año⁻¹ y una densidad de 0.82 g cm⁻³, se requiere un gasto energético mayor para construir un tejido consistente. Esta concordancia también es corroborada por Muller-Landau (2004) quien evaluó árboles tropicales en Costa Rica, Panamá, Perú y Brasil; de la misma forma, Poorter et al. (2010) afirman que

el costo de construcción de madera de baja densidad es menor, lo que permite que los tallos de los árboles crezcan más rápidamente.

Relación raíz/vástago

El valor obtenido para la relación raíz/vástago en este estudio es concordante con lo reportado por [Baskin et al. \(1999\)](#) en plantas de *Senna obtusifolia* (L.) H.S. Irwin & Barneby (Papilionoideae), las cuales también asignaron una mayor proporción de asimilados al vástago más que a las raíces (relación de 0.073), pero difiere en lo reportado por los mismos autores para plantas de la especie *S. marilandica* (L.) Link, cuyas plantas asignaron una mayor cantidad a las raíces (relación de 0.859). En este último caso, se interpreta que lo primordial es disponer de un mejor anclaje y mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes cuando los recursos del suelo son limitantes ([Villar et al., 2008](#)).

Al respecto, [Mou et al. \(2013\)](#) señalan que los patrones de asignación de recursos varían dependiendo de la identidad de las especies y edad de la planta. La influencia de estos factores puede observarse más claramente en este estudio, ya que al inicio del periodo de crecimiento las plantas asignaron una mayor cantidad de recursos particularmente hacia el vástago. Lo anterior posiblemente se deba al hecho de que *D. guianense* es una especie de germinación epígea, con cotiledones activos, que junto con las hojas realizarían un trabajo intenso fotosintético para darle a la plántula mayor cantidad de asimilados y promover su crecimiento ([Villar et al., 2008](#)); el mismo comportamiento se observó en *H. courbaril*, cuya relación fue de 0.517; esta es una especie intolerante a la sombra y con buena elasticidad ecológica ([Guzmán et al., 2013](#)). Al final del periodo de estudio las plantas empezaron a dirigir relativamente más asimilados hacia las raíces (20.6 %); esto implicará una mayor superficie de absorción y un mejor crecimiento para las etapas posteriores. [Mou et al. \(2013\)](#) mencionan que cuando un ambiente de suelo es estable, se promueve el crecimiento de raíces finas

porque ellas son más eficientes en la absorción de agua y nutrientes y la planta evita elevar los costos fisiológicos de producción de raíces grandes en un ambiente impredecible.

En condiciones de campo, las plántulas de *D. guianense* tienen una supervivencia muy baja cuando se siembran directamente ([Román-Dañobeytia et al., 2012](#)), por lo que es imprescindible para su propagación mantenerlas en invernadero suficiente tiempo hasta que la planta tenga la longitud de tallo y número de hojas necesarios para adecuarse al nuevo ambiente, tal como lo mencionan [Meli et al. \(2013\)](#), quienes recomiendan esta especie para programas de restauración activa.

CONCLUSIONES

D. guianense presentó una germinación epígea fanerocotilar con cotiledones de almacenamiento y un crecimiento lento, comparativamente con otras especies arbóreas de la misma familia, al menos hasta los 10 meses de cultivo en condiciones de vivero. Durante ese tiempo, la planta acumuló 7.87 g de biomasa y alcanzó 32.8 cm de altura. La máxima tasa relativa de crecimiento se produjo a los 60 días con un valor de 18.5 mg g⁻¹ d⁻¹. Estos indicadores pueden servir de antecedentes para su posterior propagación y definen a esta especie como tardía sucesionalmente. No obstante, el alto valor económico de su madera permite recomendarla en programas de conservación y restauración.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, E.U., de Andrade, L.A., Bruno, R. de L.A., Vieira R.M., & Cardoso, E. de A.** (2011). Emergência e crescimento inicial de plântulas de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taubert sob diferentes substratos. *Revista Ciência Agronômica*, 42, 439-447. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000200025>
- Alves, L.M.C.J., Lima, P.B., Lima, L.F., & Zickel, C.S.** (2013). Descrição morfológica para identificação das plântulas de nove espécies lenhosas de uma floresta de restinga. *Biota Neotropical*, 3, 374-383. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1676-06032013000300036>
- Araújo, I.C.S., & Costa, M.C.G.** (2013). Biomass and nutrient accumulation pattern of leguminous tree seedlings grown on mine tailings amended with organic waste. *Ecological Engineering*, 60, 254-260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.016>
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M.** (2008). Fundamentos de fisiología vegetal. Madrid: McGraw-Hill-Interamericana. 522 p.
- Baskin, M.J., Nan, X., & Baskin, C.C.** (1999). A comparative study of the seedling-juvenile and flowering stages of the life cycle in an annual and perennial species of *Senna* (Leguminosae; Caesalpinioideae). *American Midland Naturalist*, 141, 381-390. DOI: [https://doi.org/10.1674/0003-0031\(1999\)141\[0381:ACSOTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1674/0003-0031(1999)141[0381:ACSOTS]2.0.CO;2)
- Beaune, D., Bollache, L., Muganza, M. D., Bretagnolle, F., Hohmann, G., & Fruth, B.** (2013). Artificial germination activation of *Dialium corbisieri* by imitation of ecological process. *Journal of Sustainable Forestry*, 32, 565-575. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.780199>
- Boege, K., & Dirzo, R.** (2004). Intraspecific variation in growth, defense and herbivory in *Dialium guianense* (Caesalpinioideae) mediated by edaphic heterogeneity. *Plant Ecology*, 175, 59-69. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:VEGE.0000048092.82296.9a>
- Comisión Nacional Forestal & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Conafor & Semarnat).** (2005). Manual práctico para producción de planta. Programa Nacional de Reforestación, Coordinación de Conservación y Restauración. Zapopan: Comisión Nacional Forestal, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 197 p.
- Cordero, J., & Boshier, D.H.** (2003). Árboles de centroamérica, un manual para extensionistas. Costa Rica: Oxford Forestry Institute, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie), CD-ROM.
- De Souza, T.V., Voltolini, C.H., Santos, M., & Paulillo, M.T.S.** (2012). Water absorption and dormancy-breaking requirements of physically dormant seeds of *Schizolobium parahyba* (Fabaceae-Caesalpinioideae). *Seed Science Research*, 22, 169-176. <https://doi.org/10.1017/S0960258512000013>
- Demura, T., & Ye, Z.H.** (2010). Regulation of plant biomass production. *Current Opinion in Plant Biology*, 13, 298-303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2010.03.002>
- Flores-Vindas, E., & Obando-Vargas, G.** (2003). Árboles del trópico húmedo Importancia socioeconómica (pp. 317-322). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Guzmán, Q., Antonio, J., Cordero, S., & Roberto, A.** (2013). Growth and photosynthetic performance of five tree seedlings species in response to natural light regimes from the Central Pacific of Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 61, 1433-1444.
- Hartmann, H.T., Kester, D.E., & Geneve, R.L.** (2002). Plant Propagation. Principles and Practices. New Jersey: Prentice-Hall. 880 p.
- Herrero-Jáuregui, C., García-Fernández, C., Sist, P.L., & Casado, M.A.** (2009). Conflict of use for multi-purpose tree species in the state of Pará, eastern Amazonia, Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 18, 1019-1044. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9456-7>
- Hodge, A., Berta, G., Doussan, C., Merchan, F., & Crespi, M.** (2009). Plant root growth, architecture and function. *Plant Soil*, 321, 153-187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9929-9>
- Hunt, R.** (1982). Plant growth curves: The functional approach to plant growth analysis. Baltimore: University Park Press. 248 p.
- Jiménez, M.Q., Rojas, F.E.R., Rojas, V.C., & Rodríguez, L.S.** (2002). Árboles maderables de Costa Rica:

- ecología y silvicultura*. Santo Domingo de Heredia: Instituto Nacional de Biodiversidad. 361 p.
- Kidner, A.C., & Umbreen, S.** (2010). Why is leaf shape so variable? *International Journal of Plant Developmental Biology*, 3, 64-75.
- King, D.A., Davies, S.J., Tan, S., & Noor, N. S.** (2006). The role of wood density and stem support costs in the growth and mortality of tropical trees. *Journal of Ecology*, 94, 670-680. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01112.x>
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J.J.M., & Pinzón-López, L.L.** (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30, 343-353.
- Meli, P., Martínez-Ramos, M., & Rey-Benayas, J.M.** (2013). Selecting species for passive and active riparian restoration in Southern Mexico. *Restoration Ecology*, 21, 163-165. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2012.00934.x>
- Mou, P., Jones, R.H., Tan, Z., Bao, Z., & Chen, H.** (2013). Morphological and physiological plasticity of plant roots when nutrients are both spatially and temporally heterogeneous. *Plant Soil*, 354, 373-384. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1336-y>
- Muller-Landau, H.C.** (2004). Interspecific and inter-site variation in wood specific gravity of tropical trees. *Biotropica*, 35, 20-32. DOI: <https://doi.org/10.1646/02119>
- Olajide, O., Oyedeji, A.A., Tom, G.S., & Kayode, J.** (2014). Seed germination and effects of three watering regimes on the growth of *Dialium guineense* (Wild) seedlings. *American Journal of Plant Sciences*, 5, 3049-3059. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.520321>
- Orhue, R.E.** (1997). Compound fertilizer effects on growth of *Dialium guineense* seedlings. *Forest, Farm and Community Tree Research Reports*, 2, 38-40.
- Pennington, T.D., & Sarukhán, J.** (2005). Árboles tropicales de México. (pp. 232-233). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica.
- Poorter, L., McDonald, I., Alarcón, A., Fichtler, E., Licona, J.C., Peña-Claros, M., Sterck, F., Villegas, Z., & Sass-Klaassen, U.** (2010). The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist*, 185, 481-492. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>
- Quiroz, M.I., García, E.R., González, M.O., Chung, P.G.P., & Soto, H.G.** (2009). Vivero forestal. Producción de plantas nativas a raíz cubierta. Concepción, Chile: Centro Tecnológico de la planta forestal, Gobierno de Chile. 128 p.
- Ramírez, M.L.** (2004). Distribución y áreas con potencial productivo de nueve especies arbóreas de la selva alta perennifolia en México. (Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas). México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. 112 p.
- Rolim, S.G., & Chiarello, A.G.** (2004). Slow death of Atlantic forest trees in cocoa agroforestry in southeastern Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 13, 2679-2694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-004-2142-5>
- Román-Dañobeytia, F., Levy-Tacher, S., Perales-Rivera, H., Ramírez-Marcial, N., Douterlungne, D., & López-Mendoza, S.** (2007). Establecimiento de seis especies arbóreas nativas en un pastizal degradado en la selva lacandona, Chiapas, México. *Ecología Aplicada*, 6, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.21704/rea.v6i1-2.335>
- Román-Dañobeytia, F.J., Levy-Tacher, S.I., Aronson, J., Rodrigues, R.R., & Castellanos-Albores, J.** (2012). Testing the performance of fourteen native tropical tree species in two abandoned pastures of the Lacandon rainforest region of Chiapas, Mexico. *Restoration Ecology*, 20, 378-386. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2011.00779.x>
- Santos, P.H., & Buckeridge, M.S.** (2004). The role of the storage carbon of cotyledons in the establishment of seedlings of *Hymenaea courbaril* under different light conditions. *Annals of Botany*, 94, 819-830. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mch209>
- Sautu, A., Baskin, J.M., Baskin, C.C., & Condit, R.** (2006). Studies on the seed biology of 100 native species of trees in a seasonal moist tropical forest, Panama, Central America. *Forest Ecology and*

Management, 234, 245-263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.07.006>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), & Comisión Nacional Forestal (Conafor) (2014). Inventario estatal forestal y de suelos, Guadalajara. Guadalajara: Semarnat y Conafor. 124 p.

Vargas-Simón, G., Molina-Martínez, R.F., & Mo-guel-Ordoñez, E.J. (2003). Caracterización del fruto, semilla y estudios de germinación del guapaque (*Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith). *Universidad y Ciencia*, 19, 77-83.

Vargas-Simón, G., & Pire, R. (2009). Efecto de la longitud radicular al momento del trasplante sobre el crecimiento vegetativo del cuijinicuil (*Inga jinicuil* Schtdl, & Cham. ex. G. Don) en invernadero. *Agrociencia*, 43, 603-608.

Vebrova, H., Lojka, B., Husband, T.P., Zans, M.E.C., Van Damme, P., Rollo, A., & Kalousova, M. (2014). Tree diversity in cacao agroforests in San Alejandro, Peruvian Amazon. *Agroforestry Systems*, 88, 1101-1115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9654-5>

Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J.L., Poorter, H., Valladares, F., & Marañón, T. (2008). Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. En: F. Valladares Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (pp. 193-230). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente. EGRAF, S. A.

Vozzo, J.A. (2001). *Tropical tree seed manual*. Washington D.C.: USDA Forest Service, Agriculture Handbook. 721 p.

Wittmann, F., Householder, E., Piedade, M.T., de Assis, R.L., Schöngart, J., Parolin, P., & Junk, W.J. (2013). Habitat specificity, endemism and the neotropical distribution of Amazonian white-water floodplain trees. *Ecography*, 36, 690-707. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07723.x>

Zárate, D. A., Andresen, E., Estrada, A., & Serio-Silva, J. C. (2014). Black howler monkey (*Alouatta pigra*) activity, foraging and seed dispersal patterns in shaded cocoa plantations versus rainforest in southern Mexico. *American Journal of Primatology*, 76, 890-899. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajp.22276>



EXPANSIÓN LINEAL Y PUNTO DE SATURACIÓN DE LAS FIBRAS DE LA *Guadua angustifolia* Kunth

Linear expansion and fiber saturation point of *Guadua angustifolia* Kunth

Mateo Gutiérrez González ¹, Jessika Isabel Bonilla Santos², María Fernanda Cruz Amado³
& Juan Guillermo Quintero Aranzalez⁴

Gutiérrez-González, M., Bonilla-Santos, J.I., Cruz-Amado, M.F., & Quintero-Aranzalez, J.G. (2018). Expansión lineal y punto de saturación de las fibras de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Colombia Forestal*, 21(1), 69-80

Recepción: 13 de marzo de 2017

Aceptación: 28 de agosto de 2017

Resumen

La *Guadua angustifolia* Kunth es una especie de bambú que ha sido ampliamente utilizado en la construcción. Gracias a su capacidad de absorber agua, la *G. angustifolia* experimenta cambios en sus dimensiones, resistencia y rigidez debido a la variación del contenido de humedad. El punto de saturación de las fibras (PSF) se alcanza cuando a un determinado contenido de humedad el material no presenta cambios dimensionales ni variaciones en la resistencia mecánica. Para determinar el PSF de *G. angustifolia* se analizaron probetas de la parte inferior, intermedia y superior de la guadua. Se utilizaron dos metodologías: el primer método midió la variación dimensional, encontrando que el PSF está alrededor de 34.05 %; el segundo determinó la variación de la resistencia a la compresión paralela, encontrando que el PSF está alrededor de 34 %. Por último, se presentaron los factores de modificación de la resistencia a compresión para diferentes contenidos de humedad, así como la ecuación de expansión lineal del material.

Palabras clave: contenido de humedad, higroscópico, punto de saturación de las fibras, resistencia a la compresión, rigidez, variación dimensional.

Abstract

Guadua angustifolia Kunth is a bamboo species, which has been widely used in construction. *G. angustifolia* is considered a hygroscopic material due to its capacity of absorb water, leading to changes in dimensions, strength, and stiffness due to variation of moisture content. The fibre saturation point (FSP) is reached when at certain moisture content, the material does not present dimensional changes and does not undergo variations in the mechanical strength. Specimens from the upper, middle and upper part of the bamboo were analysed in order to determine the FSP. Two methods were used to determine the FSP; the first method used the dimensional variation of the material at different moisture contents. The results showed that FSP is around 34.05%. The second method allowed verifying the FSP of *Guadua angustifolia* Kunth from the analysis of the parallel compression strength at different moisture contents. This method found that FSP was around 34%. Finally, a modification factor due to moisture content for compression strength was presented, as well as the equation for linear expansion of the material.

Key words: moisture content, hygroscopic, fibre saturation point, compression strength, stiffness, dimensional variation.

1 School of Civil Engineering, The University of Queensland. Brisbane, Australia. m.gutierrezgonzalez@uq.edu.au. Autor para correspondencia.

2 Facultad de Ingeniería, Universidad La. Bogotá D.C, Colombia. jessikaisabel.bonilla@ulagrancolombia

3 Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia. Bogotá D.C, Colombia. mariafernando.cruz@ulagrancolombia.edu.co

4 Facultad de Ingeniería, Universidad La Gran Colombia. Bogotá D.C, Colombia. juanguillermo.quintero@ulagrancolombia.edu.co

INTRODUCCIÓN

La *G. angustifolia* Kunth es una especie de bambú que se ha sido usado por diferentes comunidades de América latina desde hace cientos de años. Durante las últimas décadas, el interés por utilizar este material para aplicaciones en la industria de muebles, fabricación de utensilios, artesanías y construcción ha crecido considerablemente. Su uso se ha dado gracias a los conocimientos y técnicas aprendidos a través de la experiencia, pero poco ha sido el desarrollo ingenieril del material, lo que ha conducido en muchos casos a un uso inadecuado o incorrecto (Correal, 2016). Particularmente, la industria de la construcción ha utilizado la *G. angustifolia* para la elaboración de viviendas o puentes, los cuales han sido construidos en su mayoría sin ningún tipo de diseño estructural y con baja supervisión técnica (Dowling, 2004; Luna et al., 2011), conduciendo a errores que han llevado al colapso de estructuras. Desde comienzos del nuevo milenio, Colombia ha liderado la elaboración de normas que han permitido entender muchas de las características de la guadua, con el fin de que las industrias que utilizan el material puedan incrementar su uso y mejorar su comportamiento, para así poder darle un mejor y seguro aprovechamiento (Gatóo et al., 2014).

La *G. angustifolia* es un material higroscópico que puede absorber agua del ambiente que le rodea. Las variaciones en el contenido de humedad dentro de ciertos rangos permiten que el material experimente cambios tanto en su peso como en sus dimensiones, debido a que el agua puede depositarse tanto en las cavidades como en las paredes celulares de la planta. El contenido de humedad en el bambú varía significativamente dependiendo del estado en el que se encuentre. Un bambú joven recién cortado, en condición verde, puede tener contenidos de humedad de hasta un 150 % (Hidalgo, 2003; Liesse & Köhl, 2015). Después de sufrir un proceso de secado natural o controlado, el bambú pierde humedad hasta equilibrarse con el ambiente en el que se encuentra. A este contenido

de humedad se le conoce como el contenido de humedad de equilibrio, y según investigaciones realizadas anteriormente este contenido puede estar entre un 6 % y un 30 % (Hamdan et al., 2007; Gutiérrez & Briceño, 2015). Para describir la manera en la que se deposita el agua, se puede decir que una planta de bambú que se encuentra húmeda puede experimentar un proceso de secado. En principio, la primera cantidad de agua en secarse es la que se encuentra en las cavidades celulares y se conoce como *agua libre*, posteriormente se inicia la pérdida del agua que se encuentra saturando las paredes celulares, la cual se conoce como *agua higroscópica* (Cartagena, 1984). Cuando un material como la madera o el bambú tiene totalmente saturadas de agua las paredes celulares, a ese valor de contenido de humedad se le conoce técnicamente como el punto de saturación de las fibras (PSF) (Liesse & Köhl, 2015) y se caracteriza por que el material no presenta variaciones dimensionales ni variaciones en sus propiedades mecánicas para contenidos de humedad por encima de ese punto (Gutiérrez, 2011). En el bambú, el PSF está influenciado por la composición del tejido y la cantidad de constituyentes químicos. Algunos autores (Sharma 1988; Hamdan et al. 2007) han indicado que, en promedio, el PSF del bambú está alrededor del 17-25 %. Sin embargo, estos valores relativamente bajos fueron obtenidos a partir de metodologías en donde se sometieron muestras a ambientes con 100 % de humedad relativa en la atmosfera, lo cual no representa las condiciones de saturación reales de una muestra (Liesse & Köhl, 2015).

En el año 2010 se actualizó el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, y específicamente en el Título G “Estructuras de Madera y Guadua” (AIS, 2010), se consignaron diferentes valores correspondientes a las propiedades físicas y mecánicas de la guadua, los cuales son necesarios para realizar el diseño estructural de una edificación construida con guadua como elemento principal. En el reglamento se incluyeron factores de modificación de la resistencia dependiendo el

contenido de humedad y se establecieron rangos de contenido de humedad entre los que se presentaba variación de las propiedades mecánicas. Sin embargo, el valor específico para el PSF de la *G. angustifolia* no fue mencionado. Para cualquier material natural e higroscópico de uso estructural, el PSF permite determinar los intervalos de contenido de humedad entre los que pueden variar tanto la resistencia como las dimensiones geométricas del material. Además, permite calcular los factores de modificación por contenido de humedad, utilizados en la modelación de estructuras de guadua, los cuales se encuentran establecidos en la NSR-10 en la tabla G.12.7.5 "Coeficientes de modificación por contenido de humedad (C_m)". Estos factores muestran que, a medida que aumenta el contenido de humedad, la rigidez y la resistencia del material disminuyen (AIS, 2010).

De acuerdo con diversos investigadores (AIS, 2010; Gutiérrez, 2011; Jiang, 2012; Wang, 2013; Xu, et al 2014; Kamiski et al, 2016b), la variación en el contenido de humedad es uno de los factores de mayor afectación en las propiedades mecánicas del bambú. Algunos autores han encontrado que el bambú presenta disminuciones de resistencia de hasta un 30 % cuando se alcanza el PSF (Jiang et al, 2012; Xu, et al 2014). Esta pérdida de resistencia es notoria en solicitaciones de carga a compresión paralela a la fibra y cortante paralelo; a pesar de ello, otros estudios también han demostrado que ante solicitaciones de tensión paralela la resistencia mecánica es prácticamente indiferente al aumento del contenido de humedad debido a que solo se observan disminuciones de un 5 % (Gutiérrez & Takeuchi, 2014). De estos estudios también se ha encontrado que la resistencia se vuelve constante cuando el contenido de humedad varía por encima del PSF.

La construcción con *G. angustifolia* ha estado en constante crecimiento durante los últimos años, sus excelentes propiedades mecánicas han permitido la construcción de elementos estructurales con características similares de otros materiales convencionales como el concreto o el acero. La

industria de la construcción ha volcado su interés a utilizar materiales más amigables con el ambiente, altamente renovables, que tengan bajos costos energéticos y económicos, y que ofrezcan una alternativa estéticamente atractiva, aspectos que las construcciones en guadua cumplen a cabalidad (Zea, 2015). Debido al excelente desempeño que ha tenido en diferentes eventos sísmicos (Kamiski et al, 2016a), y gracias a la alta relación de resistencia-peso, el reglamento colombiano de construcciones sismo resistentes (AIS, 2010) ha permitido la construcción de viviendas con *G. angustifolia* como material estructural principal. Todas estas razones le permiten a este material convertirse en una solución técnica y económica ante la problemática social que implica el déficit de vivienda y el alto costo que esto representa en muchos países tropicales y latinoamericanos que cuentan con este recurso natural. Sin embargo, la industria de la construcción en *G. angustifolia* todavía enfrenta grandes desafíos. Es necesario determinar muchas de las variables que afectan su comportamiento físico y mecánico, como lo es el contenido de humedad. También debe entenderse el comportamiento mecánico de las estructuras, las teorías de análisis estructural que puedan aplicarse a materiales ortotrópicos, el diseño y comportamiento de las conexiones y la resistencia frente al fuego, con el fin de poder sacar un mejor provecho de este material. Esta investigación plantea dos procedimientos que permitieron encontrar el PSF de la *G. angustifolia*, así como establecer el rango de contenido de humedad y la manera en el que varía tanto la resistencia mecánica a la compresión paralela como las dimensiones geométricas del material.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Para la realización de los ensayos se utilizó la *G. angustifolia* Kunth, extraída del municipio de Calarcá, Quindío, con edad promedio de cuatro años

que cumpliera con las especificaciones de calidad especificadas en la NTC 5301 (Icontec, 2007b). Para los ensayos se tomaron probetas de diferentes partes la guadua en altura (inferior o cepa, intermedia o basa y superior o sobrebasa). Se escogió una muestra de 30 probetas con nudo y 30 probetas sin nudo. Cada probeta tuvo las siguientes dimensiones aproximadamente: 10 cm de alto, 3.5 cm de ancho y el espesor correspondía al espesor del culmo del cual fue extraída la probeta.

Metodología

Identificación del método para variar el contenido de humedad al interior del material

Las probetas se secaron en el horno durante 24 horas a una temperatura de $100 \pm 3^\circ\text{C}$, con el fin de obtener probetas con un 0 % de humedad. Cuando las probetas ya estaban secas, se sometieron a una variación del contenido de humedad para poder establecer el rango en el debían hacerse las mediciones de variación dimensional. Se sumergió cada grupo de probetas en agua en un intervalo de tiempo fijo con el objetivo de determinar el contenido de humedad en el cual las dimensiones de cada una de las probetas permanecieran constantes. El proceso de inmersión de las probetas a diferentes tiempos ya había sido utilizado previamente en otras investigaciones (Gutiérrez, 2011; Xu et al, 2014). Igualmente, se escogió esta metodología pues era posible obtener contenidos de humedad mayores al 30 % en menos de tres horas. Otras metodologías reportadas en la literatura (Hamdan et al, 2007), utilizaron cámaras de humedad relativa controlada; sin embargo, este procedimiento no permite alcanzar contenidos de humedad en el material mayores al 26 %, lo cual limita significativamente el alcance de la investigación.

Curvas de variación dimensional

Para determinar la variación dimensional a partir del contenido de humedad del material se estudiaron grupos de 30 probetas con y sin nudo, estudiando las tres principales partes de la planta:

cepa, basa y sobrebasa, esto con el fin de tener en cuenta la variación en la densidad de fibras en el material (Grosser & Liese, 1971), para un total de 180 probetas de estudio. Las probetas fueron marcadas de acuerdo con su procedencia y características, así como también se marcó las dimensiones geométricas a medir según cada condición diferente de humedad. A cada una de las probetas se le midieron sus tres dimensiones (longitudinal, tangencial y radial) mediante un calibrador pie de rey digital vernier para así obtener un valor promedio de cada una de ellas. Las probetas se sumergieron durante diferentes tiempos previamente definidos y en cada uno se tomaron las dimensiones en todas las direcciones, así como el peso de la probeta, para así determinar posteriormente el CH al que se realizó cada medición.

La determinación del contenido de humedad se llevó a cabo según lo mencionado en la Norma Técnica Colombiana NTC 5525 "Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth" (Icontec, 2007a). El contenido de humedad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$CH(\%) = \frac{W_i - W_0}{W_0} * 100 \quad \text{ecuación 1. Contenido de humedad}$$

Dónde CH (%) corresponde al contenido de humedad expresado en porcentaje, W_i es el peso inicial de la probeta y W_0 es el peso seco o anhidro de la probeta.

Con los datos obtenidos, se calculó el porcentaje de variación dimensional de cada una de las probetas, teniendo en cuenta cada una de las variables mencionadas anteriormente, con el fin de observar la variación en la longitud de cada dimensión estudiada (longitudinal, tangencial y radial), así como también el porcentaje de contenido de humedad. Se realizó un análisis estadístico mediante el criterio de Chauvenet para eliminar datos atípicos para cada porcentaje de expansión lineal en función del contenido de humedad, en cada una de las partes de la guadua. Con estos datos se realizaron las gráficas de expansión dimensional

(%) versus contenido de humedad (%). Se estableció que el PSF correspondería al contenido de humedad a partir del cual las probetas no presentarían un aumento porcentual en sus dimensiones.

Curvas de resistencia a la compresión paralela a las fibras a partir de diferentes contenidos de humedad

Para la obtención de la curva de resistencia a compresión vs. contenido de humedad, se utilizaron un total de 75 probetas pertenecientes a las diferentes partes del culmo (cepa, basa y sobrebasa). En las probetas utilizadas se midió el diámetro externo e interno para determinar el área y con este valor poder hallar el esfuerzo que soporta cada probeta.

Para variar el contenido de humedad, las probetas fueron sumergidas en agua durante los tiempos encontrados previamente en los ensayos realizados para variar las dimensiones de las probetas. Se pesaron las probetas húmedas y se llevaron a la máquina de compresión Versa Tester de la Universidad La Gran Colombia, siendo ensayadas con los procedimientos descritos en la NTC 5525 (González & Díaz, 1992; Icontec, 2007a; González & Leguizamón, 2012).

Con las muestras ya ensayadas, era necesario conocer el contenido de humedad, por esta razón se introdujeron en el horno para secarlas y calcular el CH de cada una de las probetas siguiendo el procedimiento establecido en la NTC 5525 (Icontec, 2007a). Con los datos obtenidos se realizó una gráfica de esfuerzo a compresión paralela contra contenido de humedad encontrando así el PSF de la guadua, que se presenta cuando la resistencia a la compresión permanece constante a pesar del aumento del contenido de humedad.

RESULTADOS

Al analizar los valores obtenidos para la expansión longitudinal se puede observar que en general, para la dirección longitudinal, las probetas no

se expanden más de un 0.8 % para contenidos de humedad de hasta el 60 %. Esta situación también se presentó en probetas de todas las partes de la guadua en altura (cepa, basa y sobrebasa). En este sentido, se puede decir que el bambú presenta un comportamiento similar al de la madera ya que la expansión longitudinal del material en función del contenido de humedad del material es menor al 1 %, lo cual es prácticamente insignificante para un elemento estructural. Debido a la poca relación entre variación longitudinal y contenido de humedad, estos resultados no fueron tenidos en cuenta para encontrar el PSF.

Para determinar el PSF se decidió analizar de manera independiente cada una de las variables involucradas, teniendo en cuenta únicamente los resultados de las dos dimensiones que registraron mayor variación dimensional (tangencial y radial). Estas variaciones dimensionales se analizaron para probetas de la cepa y basa, y para probetas con nudo y sin nudo. Se decidió no utilizar los resultados obtenidos para la sobrebasa ya que no presentaron un comportamiento similar al que presentaron las otras dos variables. Al ver que los resultados para la cepa y la basa fueron similares, se hizo el análisis sin importar la dimensión y la procedencia, así como la presencia o ausencia de nudo. Se sabe que la parte de la guadua que presenta mayor tejido parenquimático es la cepa, debido a que en su estructura interna hay una menor densidad de fibras. Los resultados encontrados evidencian que la cepa absorbe mayores contenidos de humedad en un menor tiempo, comparado con los contenidos absorbidos en la basa y sobrebasa. Esto se debe a que el tejido parenquimático es el principal responsable de la absorción de agua en el material.

En las figuras 1a y 1b se presentan la variación dimensional tangencial y radial versus contenido de humedad para probetas de cepa y basa respectivamente. Al observar un comportamiento similar en cada una de las variables analizadas, se decidió analizar en una misma gráfica el comportamiento de la dimensión tangencial y radial en ambas

partes, con el objetivo de determinar un único valor del PSF (figura 2). Igualmente, se expresó la expansión como una función lineal del CH. Estas gráficas presentan un resumen detallado de los

resultados obtenidos para cada una de las variables analizadas de acuerdo a la expansión lineal en la dirección tangencial y radial de la *G. angustifolia* Kunth (figuras 1a, 1b y 2).

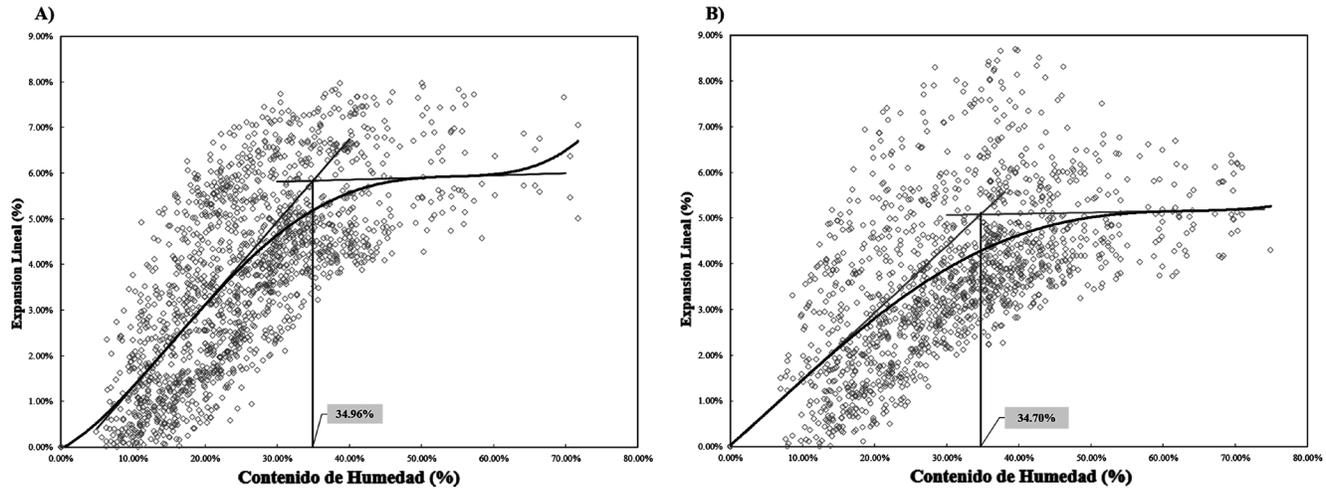


Figura 1. Expansión lineal de cepa en la dirección radial y tangencial en función del contenido de humedad (A) expansión lineal de basa en la dirección radial y tangencial en función del contenido de humedad (B).

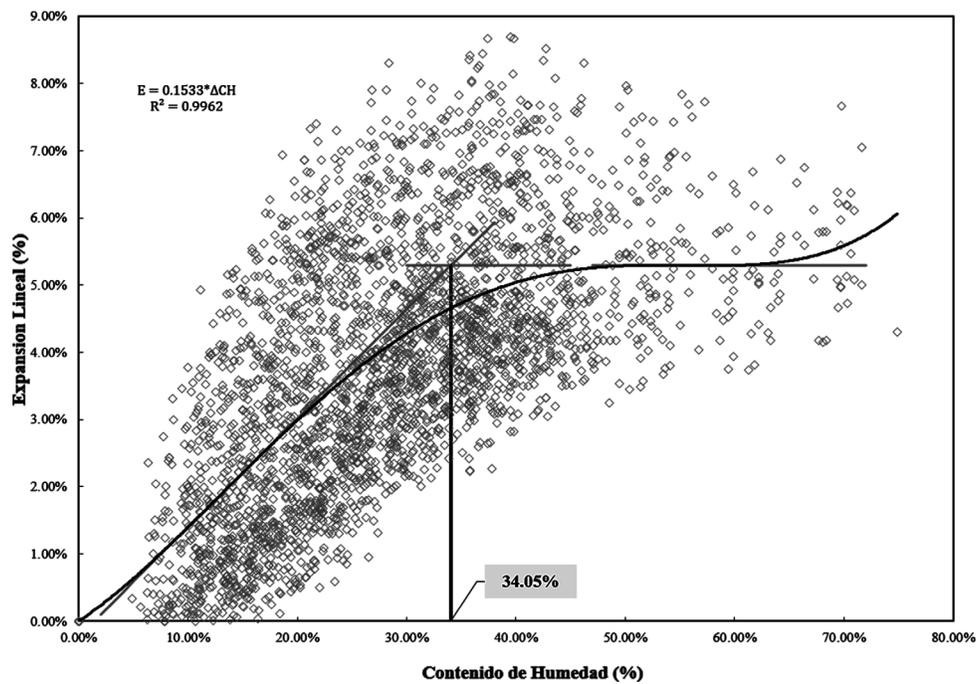


Figura 2. Expansión lineal de cepa y basa en la dirección radial y tangencial en función del contenido de humedad.

A partir de estos resultados se utilizó la parte lineal de la [figura 2](#), con el fin de tener una ecuación que permita calcular la expansión lineal de la guadua, cuando el material sufre un aumento en el contenido de humedad, siempre y cuando el contenido de humedad se encuentre por debajo del PSF, en este caso, 34.05 %. Por lo tanto, la expansión lineal que puede sufrir un elemento de guadua rolliza en su dirección radial o tangencial se puede expresar como:

$$E (\%) = 0.1533(CH_f (\%) - CH_i (\%)) \text{ ecuación 2.}$$

Expansión lineal de la guadua

Para $CH_f \leq \text{PSF}$ (PSF = 34 %)

Donde E corresponde a la expansión lineal de la guadua en porcentaje, CH_f es el contenido final de la guadua, CH_i es el contenido inicial de la guadua antes del aumento en su humedad. Ambos contenidos deben expresarse en porcentaje para obtener la expansión lineal en porcentaje.

Después de analizada la variación dimensional y los respectivos resultados del PSF de la guadua, se procedió a realizar el análisis del comportamiento de la resistencia mecánica a la compresión paralela versus el contenido de humedad. Al evaluar la gráfica de resistencia vs. contenido de humedad, se espera que la resistencia a la compresión disminuya a medida que aumenta el CH en el material. Sin embargo, se creía que a partir del PSF la resistencia se mantenga constante. En la [figura 3](#) se presentan los resultados de resistencia mecánica a la compresión paralela para las tres diferentes partes de la guadua en altura. Como se ha demostrado anteriormente, la presencia o ausencia de nudo en las probetas no representa diferencias significativas en los esfuerzos últimos a compresión ([González, 2006](#)). Los resultados experimentales obtenidos en este trabajo fueron complementados con los resultados encontrados por [González & Leguizamón \(2012\)](#).

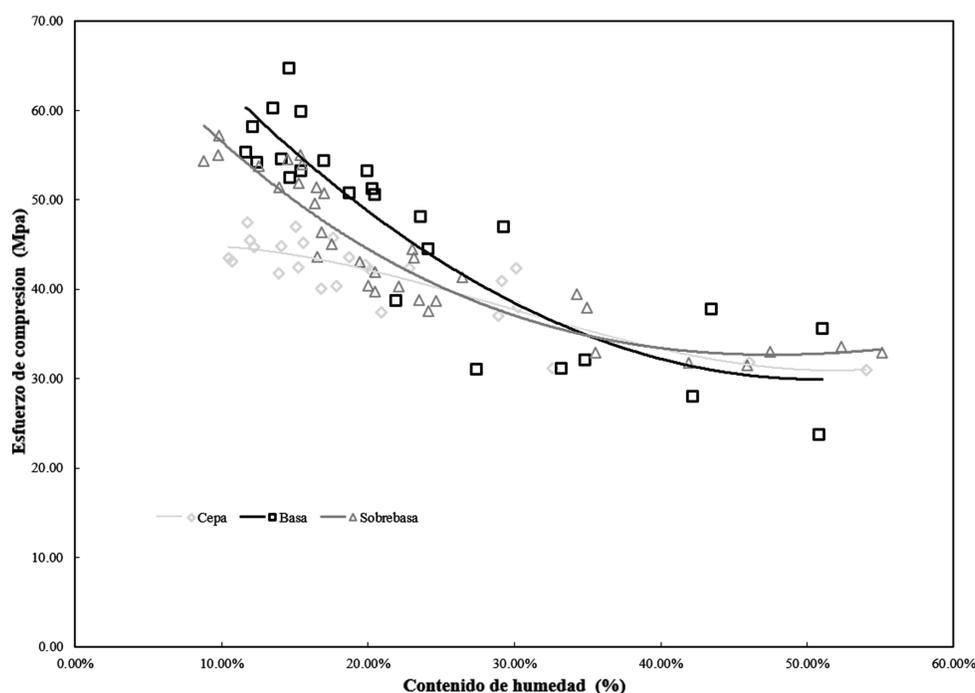


Figura 3. Variación de la resistencia a la compresión paralela en función del contenido de humedad.

De acuerdo con lo que se observa en la [figura 4](#), se evidencia que la basa y sobrebasa resisten mayores esfuerzos de compresión paralela en comparación con la cepa, la cual resiste un menor esfuerzo debido a que esta parte presenta una menor densidad de fibras ([Liese, 1998](#)), tal como lo han reportado diversos autores ([Tan et al., 2011](#); [Luna et al, 2012](#)). Igualmente, se observa que en la cepa la pendiente de la figura esfuerzo último a compresión versus humedad es menos pronunciada en comparación con las zonas de basa y sobrebasa.

En la [figura 4](#) se presenta la curva de esfuerzo a la compresión paralela en función del contenido de humedad para todas las partes de la guadua en altura. De esta gráfica se determinó que, de acuerdo con los ensayos de resistencia, el PSF de la *G.*

angustifolia Kunth corresponde a 34.00 %, ya que a partir de ese CH presenta un cambio de la pendiente y la resistencia a la compresión se mantiene prácticamente constante.

Con estos resultados también fue posible plantear los factores de modificación de la resistencia a la compresión en la *G. angustifolia*, al encontrar que la resistencia a la compresión paralela a la fibra varía significativamente para contenidos de humedad entre el 10 % y el 34 %, punto que se ha escogido como el PSF. En ese rango, la guadua puede disminuir su resistencia hasta en un 35 % tal y como se muestra en la [figura 4](#). Utilizando la ecuación de la línea recta con los datos normalizados de la resistencia a la compresión entre 10 % y 34 % de CH, se puede plantear un factor de modificación de la resistencia como se muestra en la [tabla 1](#).

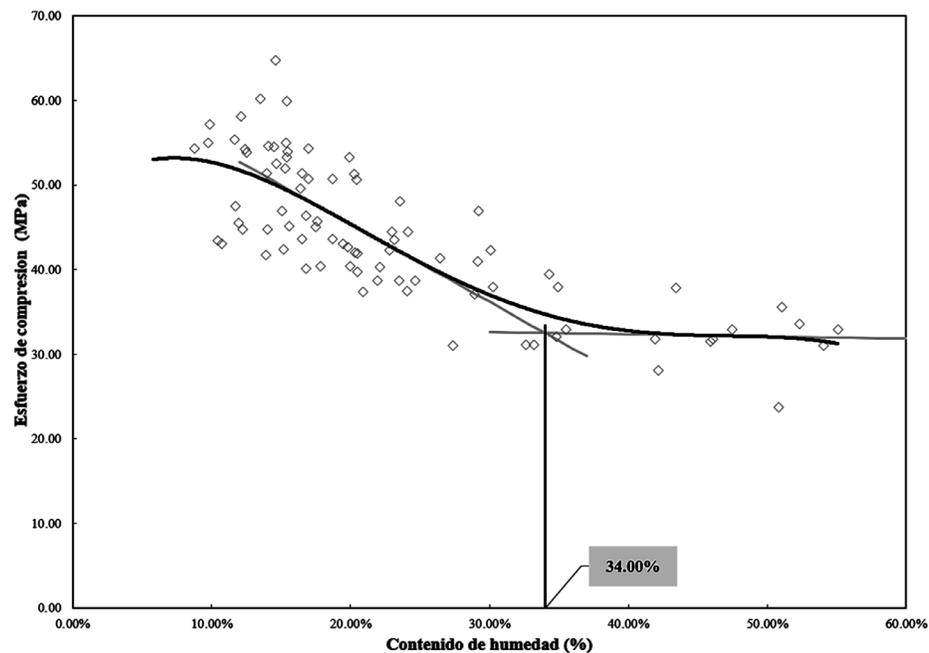


Figura 4. Variación de la resistencia a la compresión paralela a partir del contenido de humedad.

Tabla 1. Factores de modificación de la resistencia a la compresión paralela (F_c) para diferentes contenidos de humedad por debajo del PSF.

CH (%)	≤ 10 %	12 %	14 %	16 %	18 %	20 %	22 %	24 %	26 %	28 %	30 %	≥ 34 %
FM (f_c)	1.00	0.98	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.80	0.77	0.74	0.71	0.65

DISCUSIÓN

Los resultados presentados demuestran que el PSF de la *G. angustifolia* se encuentra alrededor del 34 % de contenido de humedad. Este resultado es similar a lo presentado por [Montoya \(2007\)](#), [Xu et al. \(2014\)](#) y [Jiang et al. \(2015\)](#), quienes han establecido que otras especies de bambúes han presentado PSF alrededor del 30 %, lo cual han descubierto a partir de la variación de la resistencia mecánica ante diferentes sollicitaciones de carga, o partir de las curvas de sorción del material. Sin embargo, otros autores como [Hidalgo \(1981, 2003\)](#) y [Hamdan et al. \(2007\)](#) también han planteado que el PSF en algunos bambúes es menor y puede estar alrededor del 24 %. En algunas investigaciones, el PSF han sido obtenido a través de isothermas de sorción, al exponer probetas de bambú en un ambiente completamente saturado, es decir, con una humedad relativa del 100 % a diferentes temperaturas. Esta condición es muy diferente a la de tener probetas totalmente sumergidas, expuestas en ambientes saturados de agua en forma líquida, y no en forma de vapor, lo cual obviamente conduce a resultados diferentes. En otras investigaciones realizadas por el autor, se ha podido encontrar que la *G. angustifolia* alcanza un CH de hasta el 26 %, en condiciones ambientales con humedades relativas por encima del 90 % ([Gutiérrez & Briceño, 2015](#)); sin embargo, esto no permite determinar que ese valor corresponde al del PSF.

La metodología propuesta permitió determinar que el bambú, al igual que la madera, no presenta variaciones dimensionales significativas en la dirección longitudinal debido a que la expansión lineal encontrada para valores de CH por encima del PSF no fue mayor a 0.8 %. Sin embargo, la expansión radial y tangencial sí puede ser de hasta un 6 %, lo cual coincide con lo encontrado para la madera ([Forest Products Laboratory, 2010](#)). Se puede confirmar que la *G. angustifolia* se contrae o expande principalmente en dirección radial, mientras que dirección axial presenta deformaciones mínimas debido al cambio en el CH ([Liesse & Köhl, 2015](#)).

Se encontró que la parte de la guadua en altura, y la presencia o ausencia de nudo no son variables determinantes para establecer el PSF del material, ya que los valores de PSF no variaron en más de 1 % con respecto al CH encontrado para cada variable de manera independiente. Igualmente, por las condiciones en las que se utiliza la guadua como material estructural, siempre es necesario contar con elementos que poseen tramos con o sin nudo, o con longitudes que abarcan diferentes partes en altura, por lo que siempre se deberá trabajar con un único valor de PSF sin importar estas variables geométricas. De acuerdo con [Liesse & Köhl \(2015\)](#), cuando el contenido de humedad es relativamente bajo (por debajo del PSF), la expansión debida a la absorción de agua es prácticamente igual a la contracción debida a la adsorción, razón por la que los resultados presentados pueden utilizarse para describir fenómenos de contracción o expansión para CH por debajo del PSF. Según los resultados obtenidos, la dimensión radial alcanzó expansiones máximas de hasta un 6.5 %, las expansiones tangenciales máximas fueron de 5.1 % y las longitudinales de máximo 0.8 %. Se puede observar que los cambios dimensionales en la dirección tangencial y radial del bambú son prácticamente iguales. Mientras la contracción tangencial de la madera es casi el doble de la contracción en la dirección radial. La contracción o expansión aparente del bambú en dirección radial es levemente mayor, aunque muy parecida a la contracción o expansión en dirección tangencial. Según [Liesse & Köhl \(2015\)](#), esto puede atribuirse a dos efectos: en primer lugar, el bambú no contiene células orientadas radialmente como sí se presenta en la madera, lo que podría limitar la contracción en esa dirección; y, en segundo lugar, cuando los canutos de bambú se secan o se humedecen, el transporte principal de agua está dirigido radialmente a través de la lacuna y, por lo tanto, la inestabilidad dimensional ocurre principalmente en la dirección radial ([Liesse & Köhl, 2015](#)).

Respecto a la variación de la resistencia a la compresión en función del contenido de humedad, los resultados obtenidos se asimilan a lo

presentado actualmente en el reglamento colombiano de construcción resistente (AIS, 2010), el cual determina que la resistencia puede disminuirse hasta en un 30 %, tal como lo plantea Jiang *et al.* (2012), Xu *et al.* (2014) y Wang *et al.* (2015). Otros autores, a pesar de coincidir en la disminución en la resistencia, han planteado que esta disminución se da entre un 12 y un 18 % de CH, sugiriendo que el PSF es igual a 19 % (AIS, 2010; Kaminski *et al.*, 2016b). Sin embargo, esto difiere con lo encontrado en esta investigación. Es importante mencionar que muchas de estas investigaciones se han realizado con diferentes especies de bambú, y aunque también han demostrado que la disminución de la resistencia a la compresión paralela puede llegar a ser de hasta un 30 %, hasta el momento es muy poco lo que se ha publicado para la especie *G. angustifolia* Kunth.

CONCLUSIONES

Las dimensiones radiales y transversales presentaron una mayor expansión lineal para todas las partes de la guadua en comparación con la dimensión longitudinal, ya que en general la dimensión radial alcanzó expansiones máximas de hasta un 6.5 %, las dimensiones tangenciales de 5.1 % y las longitudinales de máximo 0.8 %.

Se encontró una ecuación matemática que permite describir la expansión lineal porcentual que experimentaría un elemento de guadua rolliza en su dirección radial, lo cual podría ser de gran interés para las diferentes industrias que trabajan con el material.

A partir de los ensayos realizados donde se midieron los cambios dimensionales, así como a partir de los ensayos de resistencia a compresión paralela, se determinó que el PSF para la guadua se encuentra alrededor de 34 % de CH.

Se plantearon los factores de modificación de la resistencia a la compresión paralela a partir de la variación en el contenido de humedad, encontrando que la resistencia de la guadua puede

disminuirse hasta en un 35 % para contenidos de humedad comprendidos entre el 10 % y el 34 %.

Los resultados encontrados permitirán a profesionales, diseñadores estructurales y constructores con bambú guadua comprender el rango de contenido de humedad en el cual el material presenta cambios en sus dimensiones, así como variación de sus propiedades mecánicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad La Gran Colombia, por el apoyo y la financiación en el desarrollo y presentación de los resultados de esta investigación. Igualmente, se agradece a cada uno de los docentes que aportaron sus conocimientos para la realización de este proyecto.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación Colombiana de ingeniería Sísmica (AIS).** (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Título G—Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua. Bogotá: AIS. 168 p.
- Junta del Acuerdo de Cartagena.** (1984). Manual de diseño para maderas del grupo Andino. Lima: Junta del Acuerdo de Cartagena. 560 p.
- Correal, J.F.** (2016). Bamboo design and construction. En K. Harries & B. Sharma (eds.), Nonconventional

- and Vernacular Construction Materials (pp. 393-431). Duxford: Elsevier Ltd.
- Dowling, D.M.** (2004). Adobe housing in El Salvador: Earthquake performance and seismic improvement. In W.I. Rose, J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr, & J.J. Major (eds.), *Natural Hazards in El Salvador: Geological Society of America*. DOI: <https://doi.org/10.1130/0-8137-2375-2.281>
- Gatío, A., Sharma, B., Bock, M., Mulligan, H., & Ramage, M.H.** (2014). Sustainable structures: bamboo standards and building codes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Engineering Sustainability*, 167(5), 189-196. DOI: <https://doi.org/10.1680/ensu.14.00009>
- Gonzalez, J.C., & Leguizamon, Y.** (2012). Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de la *Guadua (angustifolia kunth)* en función del contenido de humedad. (Trabajo de grado, Ingeniero Civil). Bogotá: Universidad la Gran Colombia. 133 p.
- Gonzalez, E., & Takeuchi, C.** (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y Universidad*, Enero-Junio, 89-103.
- Gonzalez, E., & Díaz, J.F.** (1992). Propiedades físicas y mecánicas de la guadua (*Guadua angustifolia Kunth*). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Grosser, D., & Liese, W.** (1971). On the anatomy of Asian bamboo with especial reference to their vascular bundles. *Wood Science and Technology*, 5, 22. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00365061>
- Gutiérrez, M.** (2011). Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia Kunth*. (Trabajo de grado, Maestría en Ingeniería). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 151 p.
- Gutiérrez, M., & Takeuchi, C.** (2014). Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua angustifolia Kunth*. *Scientia et Technica*, 19(3), 6.
- Forest Products Laboratory.** (2010). Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI, EE.UU.: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.
- Gutiérrez, M., & Briceño, P.A.** (2015). Equilibrium Moisture Content and Sorption Isotherms determination for different conditions of relative humidity and temperature in the bamboo *Guadua angustifolia* Kunth. Artículo presentado en 16th NOCMAT 2015, Winnipeg, Canadá.
- Hamdan, H., Hill, A.Z., U.M.K., A., & Latif, M.A.** (2007). Equilibrium moisture content and volumetric changes of *Gigantochloa Scortechinii*. *Journal of Tropical Forest Science*, 19(1), 7.
- Hidalgo, O.** (1981). Manual de construcción con bambú. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Cibam, Facultad de Artes. 87 p.
- Hidalgo, O.** (2003). *Bamboo: The Gift of the Gods*. Bogotá: Óscar Hidalgo-López. 553 p.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec).** (2007a). Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth (NTC5525). Bogotá: Icontec. 22 p.
- Icontec.** (2007b). Norma Técnica Colombiana 5301. Preservación y secado del culmo de *Guadua angustifolia Kunth*. Bogotá: Icontec. 5 p.
- Jiang, Z., Wang, H., Tian, G., Liu, X., & Yu, Y.** (2012). Sensitivity of several selected mechanical properties of moso bamboo to moisture content change under the fibre saturation point. *BioResources*, 7(4), 5048-5058. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.7.4.5048-5058>
- Jiang, Z., Wang, H., Tian, G., Liu, X., & Yu, Y.** (2015). Sensitivity of several selected mechanical properties of Moso Bamboo to moisture content change under fibre saturation point. *BioResources*, 7(4), 10.
- Kaminski, S., Lawrence, A., & Trujillo, D.** (2016). Structural use of bamboo. Part 1: Introduction to bamboo. *The Structural Engineer*. (pp. 40-43).
- Kaminski, S., Lawrence, A., Trujillo, D., Feltham, I., & Lopez, L. F.** (2016). Structural use of bamboo. Part 3: Design values. *The Structural Engineer*. (pp. 42-45).
- Liese, W.** (1998). *The Anatomy of Bamboo Culms*. Inbar Technical Report N° 18. Beijing: Inbar. 208 p.

- Liese, W., & Köhl, M.** (2015). Bamboo: The Plant and its Uses (Tropical Forestry). Cham: Springer International Publishing. 356 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- Luna, P., Lozano, J., Takeuchi, C., & Gutierrez Gonzalez, M.** (2012) Experimental determination of allowable stresses for Bamboo *Guadua angustifolia* Kunth structures. *Key Engineering Materials*, 517, 76-80. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.517.76>
- Luna, P., Takeuchi, C., Granados, G., Lamus, F., & Lozano, J.** (2011). Metodología de diseño de estructuras en guadua *angustifolia* como material estructural por el método de esfuerzos admisibles. *Revista Educación en Ingeniería*, 6(11), 66-75. DOI: <http://dx.doi.org/10.26507/rei.v6n11.117>
- Montoya, J.A.** (2007). Determinación de las curvas isothermas de sorción y el PSF -Punto de saturación de fibra de la especie de bambú *Phyllostachys pubescens* Mazel. *Scientia et Technica*, 35.
- Sharma, S.N.** (1988) Seasoning behavior and related properties of some Indian species of bamboo. *Indian For*, 114(10), 613-621.
- Tan, T., Rahbar, N., Allameh, S. M., Kwofie, S., Dissmore, D., Ghavami, K., & Soboyejo, W.O.** (2011). Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomater*, 7(10), 3796-3803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008>
- Wang, H., Wang H., Wanju L., Ren D., & Yu Y.** (2013). Effects of moisture content on the mechanical properties of moso bamboo at the macroscopic and cellular levels. *Bioresources*, 8(4), 5475-5484. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5475-5484>
- Wang, H., Tian, G., Li, W., Ren, D., Zhang, X., & Yu, Y.** (2015). Sensitivity of bamboo fiber longitudinal tensile properties to moisture content variation under the fiber saturation point. *Journal of Wood Science*, 61(3), 262-269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1466-y>
- Xu, Q., Harries, K., Li, X., Liu, Q., & Gottron, J.** (2014). Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water. *Engineering Structures*, 81, 230-239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.044>
- Zea, E., & Habert, G.** (2015). Regionalizing the Environmental Impact of Bamboo-Based Buildings by Integrating Life Cycle Assessment with Geographic Information Systems. A Comparative Case-Study in Colombia. Artículo presentado en 10th World Bamboo Congress, Damyang: Corea del Sur.



EFECTO BIOESTIMULANTE DE *Trichoderma harzianum* Rifai EN POSTURAS DE LEUCAENA, CEDRO Y SAMÁN

Biostimulating effect of *Trichoderma harzianum* Rifai on seedling of *Leucaena*, Cedar and Saman

Tarsicio Santana Díaz[†] & Leónides Castellanos González¹

Santana-Díaz, T., & Castellanos-González, L. (2018). Efecto bioestimulante de *Trichoderma harzianum* Rifai en posturas de *Leucaena*, Cedro y Samán. *Colombia Forestal*, 21(1), 81-90

Recepción: 25 de marzo de 2017

Aprobación: 28 de agosto de 2017

Resumen

El presente artículo evaluó el efecto bioestimulante de *Trichoderma harzianum* Rifai en la producción de postura de *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit., *Cedrela odorata* L. y *Albizia saman* (Jacq.) Merr. Se desarrollaron tres experimentos en condiciones de vivero, uno para cada especie. Se empleó un diseño completamente aleatorio con cuatro parcelas por tratamiento. En cada experimento los tratamientos fueron: *Trichoderma harzianum* a razón de 20 g.L⁻¹, 40 g.L⁻¹ y un testigo. Se evaluó el porcentaje de germinación y las variables morfológicas diámetro y altura del tallo, así como biomasa seca en raíz y parte aérea de la planta. Los tratamientos con *Trichoderma* no incrementaron el porcentaje de germinación en cedro, samán y leucaena. *T. harzianum* incrementó la altura, el número de hojas y la biomasa seca del área foliar en las plántulas de cedro, mientras que en leucaena y samán solo provocó incrementos del diámetro basal de las plántulas.

Palabras clave: antagonista, biomasa, especies forestales, germinación.

Abstract

The present article aims to evaluate the biostimulating effect of *Trichoderma harzianum* Rifai in the seedling production of *Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit., *Cedrela odorata* L., and *Pithecellobium saman* (Jacq.) Merr. An experiment for each specie was carried out under nursery conditions. A totally randomized design was used with four parcels by treatment. The treatments were: *Trichoderma harzianum* to reason of 20 g.L⁻¹ and to 40 g.L⁻¹, and a control. The germination percentage was evaluated, and the morphometric variables diameter of the shaft, height and dry matter of the root and the air part of the plant. The treatments with *Trichoderma* didn't increase the germination percentage in cedar, saman and leucaena. *T. harzianum* increased the height, the number of leaves and the dry biomass of the foliar area in the cedar seedlings, while in leucaena and saman only it incremented the basal diameter of the seedlings.

Key words: antagonist, biomas, forestall species, germination

¹ Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. lcastell@gmail.com

DOI: <http://doi.org/10.14483/2256201X.11744>

INTRODUCCIÓN

Los bioestimulantes son productos que contienen células vivas o latentes de cepas microbianas previamente seleccionadas que se caracterizan por producir sustancias fisiológicamente activas (auxinas, giberelinas, citoquininas, aminoácidos, péptidos y vitaminas). Cuando estas interactúan con la planta promueven diferentes eventos metabólicos en función de estimular su crecimiento y el desarrollo (Castillo *et al.*, 2007).

Las especies del género *Trichoderma* son los antagonistas más utilizados para el control de enfermedades de plantas producidas por hongos debido a su inocuidad, a su facilidad para ser aisladas y cultivadas, así como a su crecimiento rápido en un gran número de sustratos (Valdés, 2014). En algunos países como México se recomienda aplicar de forma preventiva en los viveros forestales para la prevención de enfermedades radiculares (Cibrián & Cibrián, 2017). También se incluye entre los hongos bioestimulantes, ya que son capaces de promover el crecimiento y el vigor en las plantas por la habilidad que poseen para hacer que las raíces sean más robustas, logrando mayor profundidad, por lo que son más resistentes a las sequías y pueden absorber más nutrientes (Donoso *et al.*, 2008).

Conociendo las características bioestimulantes de *Trichoderma* se han realizado diferentes investigaciones para verificar este efecto en plántulas de vivero de especies forestales y acortar el periodo en esta etapa (Donoso *et al.*, 2008; Romero *et al.*, 2008; Díaz & Ayala, 2011; Ramírez *et al.*, 2015).

Entre las especies forestales más cultivadas dentro del territorio del estado Apure, en Venezuela, se encuentran: *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. (leucaena), *Cedrela odorata* L. (cedro), *Albizia saman* (Jacq.) Merr. (samán), las cuales poseen alto valor económico, así como fácil adaptabilidad a los suelos (Inia, 2007).

L. leucocephala es una de las leguminosas originaria de América Central de uso múltiple más productiva y versátil disponible en regiones tropicales.

Se puede afirmar que es la más utilizada en sistemas extensivos de pastoreo y también para áreas de corte, además favorece el control de la erosión (Costa & Durigan, 2010), con resultados satisfactorios en Venezuela (Clavero, 1998).

C. odorata es la especie del género de mayor importancia comercial y de mayor extensión. Por su aromática madera, posee una alta demanda en los trópicos americanos debido a que es naturalmente resistente a las termitas y a la pudrición (Bentancourt, 2000).

El samán es un árbol muy importante en Latinoamérica como proveedor de sombra, especialmente en parques. En Venezuela está ampliamente distribuido en los llanos centrales. Sin embargo, su madera es muy demandada y lo han considerado bandera para la reforestación de algunas zonas de Aragua (Torres *et al.*, 2011).

Por otra parte, Parra & Gámez (2012) hacen referencia a que el cedro y el samán están en el *Libro Rojo de la Flora* de Venezuela como vulnerables, pasando de menor riesgo a casi amenazados. De ahí la importancia de lograr posturas de estas plantas con vigor y en el tiempo más corto posible en la etapa de vivero.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto bioestimulante de *Trichoderma harzianum* en la producción de postura de los árboles forestales leucaena, cedro y samán.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el vivero forestal Municipal ubicado en la población de Mantecal, municipio Muñoz, estado Apure, Venezuela, en el periodo comprendido de abril de 2012 a agosto de 2012. Se incluyeron las especies leucaena (*L. leucocephala* [Lam] de Wit), cedro (*C. odorata* L.) y samán (*A. saman* [Jacq.] Merr.).

El clima del municipio Muñoz está caracterizado por una temperatura media anual de 26.6°C y las precipitaciones estacionales oscilan entre 700 y 1500 mm anuales. Presenta dos estaciones bien

diferenciadas: un período lluvioso desde mayo hasta octubre y otro seco, desde noviembre hasta abril. Su relieve está enmarcado dentro de la depresión central llanera, que apenas se levanta de 50 a 200 metros sobre el nivel del mar (Rodríguez *et al.*, 2013).

El ensayo se desarrolló en bolsas de polietileno de 2 kg, las cuales se llenaron con una mezcla de suelo del lugar y materia orgánica (MO) de excretas de bovino descompuesta, en la proporción: 90 % de suelo y 10 % de MO (relación v/v).

El suelo empleado contó con las siguientes características: inceptisol franco limoso (relación limo/arcilla de 2.7), conductividad ds/m = 0.05, pH en agua = 6.4; MO (%) = 3.13; P (mg kg⁻¹) = 15.79; K (mg kg⁻¹) = 51.13 y Ca (mg kg⁻¹) = 221.33.

Como material de siembra se utilizaron semillas recolectadas en distintos sectores del municipio, las cuales garantizaron el 95 % de germinación según prueba previa. Se depositaron dos semillas por bolsa. Se condujeron tres experimentos, uno para cada especie forestal basados en un diseño completamente al azar, con tres tratamientos consistentes en dos variantes con plaguicidas biológicos y un testigo sin tratamiento, con cuatro réplicas. Cada réplica estuvo constituida por 20 bolsas.

Los tratamientos fueron los siguientes:

- Tratamiento con *Trichoderma harzianum* a razón de 20 g L⁻¹.
- Tratamiento con *Trichoderma harzianum* a razón de 40 g L⁻¹

Las dosis de ensayo se corresponden con las dosis máximas y mínimas recomendadas por Stefanova (2007) para el uso del biopreparado a base de *Trichoderma*, formulado sólido.

El bioproducto *T. harzianum* se obtuvo en el laboratorio de biocontroladores El Rescate Campesino, ubicado en el municipio de Biruaca del estado Apure, con una concentración entre 1-3x10⁹ conidios/g, sobre sustrato (arroz) con 25 días de cosechados, según especificaciones de calidad del producto.

En las dos variantes con *T. harzianum* se trataron las semillas por inmersión con este producto biológico a la dosis 20 g L⁻¹ por un periodo de 10 minutos, posteriormente se secaron y sembraron.

En una de las variantes biológicas se aplicó *T. harzianum* a razón de 20 g L⁻¹ cada 15 días después de la siembra con una solución final de 300 L ha⁻¹. En la otra variante biológica se aplicó *T. harzianum* a razón de 40 g L⁻¹ cada 15 días después de la siembra con una solución final de 300 L ha⁻¹. Para la frecuencia de aplicación durante el ciclo de las plántulas se utilizó el criterio seguido por Bécquer *et al.* (2016) en los tratamientos al triticale *Triticum aestivum* L.

En total, se realizaron seis tratamientos biológicos durante el ciclo de las posturas hasta los 75 días de edad.

Durante el período de desarrollo de las posturas fueron atendidas con respecto al riego, manejo y tratamientos insecticidas e insecticidas semanalmente, siguiendo las normas técnicas establecidas. Se realizaron deshierbes cada 15 días. Los riegos fueron diarios hasta un 80 % de capacidad de campo con una regadera manual, los cuales fueron suspendidos en días posteriores a los que se produjeron lluvias.

Para determinar el efecto bioestimulador de antagonista se determinaron las siguientes variables: porcentaje de germinación después de la siembra 30 días (%), altura (cm) de la planta a los 60 días, diámetro basal (mm) a los 60 días y número de hojas a los 60 días.

Cuando el 50 % al menos de las posturas alcanzó los requisitos establecidos para el trasplante (alrededor de los 90 días) se determinaron las siguientes variables: altura de la planta (cm), diámetro basal (mm), número de hojas y biomasa seca de la raíz (g) y de la parte aérea (g).

Estas variables han sido consideradas en estudios similares por otros investigadores como Medina *et al.* (2007) y Ramírez *et al.* (2015).

La altura de las plantas se midió con una regla graduada desde la base del cuello o tallo de la

planta hasta la yema terminal y diámetro basal con un pie de rey a 5 cm de la base del tallo.

Para la determinación de las masas: parte aérea, radical, se utilizó el método gravimétrico (secado en estufa a 65 °C hasta peso constante). Las plantas fueron cortadas en la base del cuello de la raíz. Se determinó por separado la biomasa seca de la raíz y de la parte aérea.

A la variable porcentaje de germinación se le realizó el análisis estadístico de comparación por la prueba de Kruskal-Wallis al comprobarse la no normalidad de los datos por la prueba de Kolmogorov-Smirnov. A la altura, número de hojas, diámetro basal de las posturas y biomasa seca en la parte aérea y las raíces se les aplicó Anova de un factor con el test de Tukey para $P \leq 0.05$ utilizando el paquete estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) para Windows versión 21.0 (IBM, 2012).

RESULTADOS

No se presentó efecto bioestimulador de los tratamientos realizados a la semilla y al suelo en relación con el porcentaje de germinación de las plantas de *L. leucocephala*, *C. odorata* y *A. saman* ya que los tratamientos con *T. harzianum* presentaron un 87.5 % de germinación y en el testigo

75 % para la primera especie ($p=0.01$), entre 95 y 87 % (testigo, $p=0.01$) para la segunda y entre 100 y 91 % (testigo, $p=0.01$) para la tercera, respectivamente.

Se manifestó un efecto bioestimulador ($p=0.024$) sobre las plantas de *L. leucocephala* al ser tratadas con *T. harzianum*, pues se observa mayor diámetro basal a los 60 días en las plantas que recibieron la dosis de la variante *T. harzianum* a 40 g L⁻¹ seguidas por la que recibieron la dosis de *T. harzianum* al 20 g L⁻¹, no difiriendo estadísticamente del tratamiento testigo. A los 90 días no se presentó diferencia estadística para esta variable de los tratamientos con relación al testigo (tabla 1).

Al analizar la variable altura de las plantas para esta especie se observaron valores entre 34 cm y 45 cm al momento del trasplante, sin diferencia estadística en las evaluaciones a los 60 y 90 días respectivamente.

Los tratamientos biológicos con *T. harzianum* no indujeron un incremento significativo del número de hojas en la especie *L. leucocephala* en relación con el testigo. No se presentó aumento de la biomasa seca de las raíces y de la parte aérea de las plantas con la aplicación de *T. harzianum* en la especie *L. leucocephala*, con respecto al tratamiento testigo.

La variable diámetro basal varió en el ensayo *C. odorata* entre 4.8 y 5.3 mm a los 60 días

Tabla 1. Diámetro y altura de las plantas de *L. leucocephala*

Tratamientos	Diámetro a los 60 días	Diámetro a los 90 días	Altura a los 60 días	Altura a los 90 días
Unidad	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)
<i>T. harzianum</i> a 20 g L ⁻¹	2.29 ab	4.32 NS	11.87 NS	34.72 NS
<i>T. harzianum</i> a 40 g L ⁻¹	2.71 a	4.79 NS	11.64 NS	45.95 NS
Testigo	1.93 b	3.93 NS	10.93 NS	34.23 NS
Valor F (Fisher) del Anova	4.25 *	0.518 NS	2.41 NS	1.72 NS
Error típico	0.205	0.473	0.756	4.14
Coefficiente de variación (%)	15.83	19.40	7.05	19.80

Medias seguidas de letras distintas en las columnas difieren entre sí por el test de Tukey ($P<0.05$); **, * y NS: significativo ($P<0.01$); ($P<0.05$) y no significativo. Respectivamente.

y entre 8.4 y 9.3 mm a los 90 días de edad, sin diferencia estadística entre las diferentes variantes estudiadas. Sin embargo, el tratamiento de *T. harzianum* a 40 g L⁻¹ provocó un aumento de la altura de las plantas de *C. odorata* a los 60 días, ya que esta variante difiere estadísticamente ($p=0.005$) del resto de los tratamientos, mostrando que hay un efecto bioestimulante sobre las plantas. En cuanto a la altura a los 90 días se observa que también la variante *T. harzianum* a 40 g L⁻¹ difiere estadísticamente ($p=0.007$) del tratamiento testigo. (tabla 2).

A los 60 días de edad de las posturas de *C. odorata* se observó un incremento del número de hojas para los tratamientos con *T. harzianum* a 20 y 40 g L⁻¹ con relación al testigo ($p=0.004$). Este efecto bioestimulante se observó también para esta

especie de planta a los 90 días, el cual fue significativo ($p=0.006$) para la variable *T. harzianum* a 40 g L⁻¹ con relación al tratamiento testigo, lo cual no resultó así para *T. harzianum* a 20 g L⁻¹. La aplicación del antagonista *T. harzianum* no provocó aumento de la biomasa de las raíces de las plántulas de *C. odorata*, pero sí sobre la biomasa seca ($p=0.008$) en la parte aérea de la planta a las dos dosis estudiadas (tabla 3).

Esta situación resulta lógica si se tiene en cuenta que, como se ha evidenciado anteriormente, las posturas de *C. odorata* tratadas con *T. harzianum* presentaron incremento en altura a los 60 y 90 días y del número de hojas a los 60 y 90 días con respecto al tratamiento testigo.

En el caso del *A. saman* en la variable diámetro basal a los 60 días mostró incremento en los

Tabla 2. Diámetro y altura de las plantas de *C. odorata*

	Diámetro a los 60 días	Diámetro a los 90 días	Altura a los 60 días	Altura a los 90 días
	(mm)	(mm)	(cm)	(cm)
Tratamientos				
<i>T. harzianum</i> a 20 g L ⁻¹	5.30 NS	9.22 NS	13.64 b	59.25 ab
<i>T. harzianum</i> a 40 g L ⁻¹	5.05 NS	9.25 NS	16.83 a	74.14 a
Testigo	4.82 NS	8.47 NS	12.41 b	43.18 c
Valor F (Fisher) del Anova	0.538 NS	2.41 NS	14.30**	12.13 **
Error típico	0.265	0.255	2.18	3.82
Coefficiente de variación (%)	10.45	5.74	10.55	13.43

Medias seguidas de letras distintas en las columnas difieren entre sí por el test de Tukey ($P<0.05$); **, * y NS: significativo ($P<0.01$); ($P<0.05$) y no significativo respectivamente.

Tabla 3. Número de hojas y biomasa de las plantas de *C. odorata*

Tratamientos	Número de hojas a los		Biomasa	
	60 días	90 días	Raíces (g)	Parte aérea (g)
<i>T. harzianum</i> a 20 g L ⁻¹	59.25 a	141.75 ab	3.79 NS	14.43 a
<i>T. harzianum</i> a 40 g L ⁻¹	74.14 a	147.50 a	4.43 NS	16.28 a
Testigo	43.18 b	134.50 b	2.97 NS	4.82 b
Valor F (Fisher) del Anova	12.13**	6.72 **	2.30	20.18 **
Error típico	3.82	2.67	0.435	0.589
Coefficiente de variación (%)	13.43	3.84	24.23	8.95

Medias seguidas de letras distintas en las columnas difieren entre sí por el test de Tukey ($P<0.05$); **, * y NS: significativo ($P<0.01$); ($P<0.05$) y no significativo respectivamente.

tratamientos con *T. harzianum* a 20 g L⁻¹ y *T. harzianum* a 40 g L⁻¹ con relación al testigo (p=0.021) (tabla 4)

A los 90 días de edad las posturas alcanzaban entre 6.38 y 7.07 mm de grosor, no evidenciándose diferencias entre los tratamientos en estudio, lo cual puede deberse a que al momento de la evaluación de las raíces se observaron numerosas modulaciones similares a las que desarrolla *Rizhobium* sp. en las leguminosas y que pudo estimular el crecimiento de las posturas en todas las variantes, incluyendo al testigo a desarrollarse esta simbiosis (tabla 5).

La variable altura de las posturas de samán varió entre 20.43 y 23.04 cm respectivamente a los

60 días y 33.5 y 45 cm a los 90 días, sin que se observaran diferencias entre las variantes estudiadas en ninguno de los dos momentos.

No se observó un incremento del número de hojas en los tratamientos con *T. harzianum* para las posturas de *A. saman*. A los 60 días se manifestaron entre 90 y 98 hojas por plantas, con un aumento considerable a los 90 días cuando alcanzaron entre 222 y 242 hojas por plantas. Tampoco se observó un incremento de la biomasa seca en las raíces y de la parte aérea de las plantas para las posturas de *A. saman* cuando fueron tratadas con *T. harzianum* en ninguna de las dosis en estudio.

Tabla 4. Diámetro y altura de las plantas del *A. saman*

Tratamientos	Diámetro a		Altura a los	
	los 60 días (mm)	los 90 días (mm)	60 días (cm)	90 días (cm)
unidad				
<i>T. harzianum</i> a 20 g L ⁻¹	4.31 a	6.67 NS	22.39 NS	44.45 NS
<i>T. harzianum</i> a 40 g L ⁻¹	4.31 a	7.07 NS	23.04 NS	46.27 NS
Testigo	3.29 b	6.58 NS	20.43 NS	33.50 NS
Valor F (Fisher) del Anova	5.83 *	0.73 NS	1.62 NS	2.64 NS
Error típico	0.20	0.422	0.87	2.16
Coefficiente de variación (%)	3.97	12.65	16.45	9.66

Medias seguidas de letras distintas en las columnas difieren entre sí por el test de Tukey (P<0.05); **, * y NS: significativo (P<0.01); (P<0.05) y no significativo respectivamente.

Tabla 5. Número de hojas y biomasa de las plantas de *A. saman*

Tratamientos	Número de hojas a los		Biomasa	
	60 días	90 días	Raíces (g)	Parte aérea (g)
<i>T. harzianum</i> a 20 g L ⁻¹	96.66 NS	222.39 NS	3.82 NS	10.94 NS
<i>T. harzianum</i> a 40 g L ⁻¹	97.58 NS	234.20 NS	3.62 NS	10.71 NS
Testigo	90.79 NS	222.78 NS	2.62 NS	7.98 NS
Valor F (Fisher) del Anova	0.106 NS	0.971 NS	0.674 NS	0.940 NS
Error típico	9.77	9.75	0.798	1.40
Coefficiente de variación (%)	20.43	8.45	34.95	28.18

NS: Medias en las columnas no difieren entre sí por la prueba de Tukey (P<0.05).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos relacionados con la estimulación de la germinación de la semilla concuerdan con los de [Díaz & Ayala \(2011\)](#) cuando trataron solamente con *T. harzianum* las semillas de majagua (*Talipariti elatum* [Sw.] Fryxell), pero no con los de [Ramírez et al. \(2015\)](#), quienes observaron incrementos de porcentajes de germinación en otras especies forestales soplillo (*Lysiloma behanensis* L.), yarúa (*Caesalpinia violacea*, [Mill.] Standl) y albizzia (*Albizia procera* [Roxb.] Benth) al aplicar *T. harzianum* con relación los testigos, pero para estas especies los testigos sin tratamiento del antagonista presentaron porcentajes de germinación entre 63 y 75 %.

Los valores de diámetro basal obtenidos para leucaena se corresponden con los obtenidos por otros investigadores en las condiciones de Cuba ([Hernández & Seguí, 1997](#)), mientras que los valores de altura obtenidos para leucaena se corresponden con los informados por otros investigadores en las condiciones del estado de Aragua en Venezuela al momento del trasplante, los cuales fueron alrededor de 45 cm ([Medina et al., 2007](#)).

El número de hojas por plantas obtenidas fue superior a 1500 en todos los tratamientos, lo cual se corresponde a los observado por otros investigadores ([Medina et al., 2007](#)), quienes informaron más de 1000 hojas por planta, lo cual da una idea del desarrollo que alcanzaron las posturas de leucaena. El no incremento de la biomasa con los tratamientos biológicos resulta lógico si se tiene en cuenta que el biopreparado no tuvo un efecto sobre las plantas en las variables, altura, diámetro basal a los 90 días ni número de hojas.

No se encontraron trabajos donde se haya aplicado *T. harzianum* en la obtención de posturas de *L. leucocephala*, aunque se conoce que no todas las especies de plantas responden de igual forma a los metabolitos bioestimulantes que produce *T. harzianum*; y al parecer por ser *L. leucocephala* una especie bien adaptada a variadas condiciones edafológicas y ambientales, este efecto no se hizo

evidente. La alta adaptabilidad de *L. leucocephala* se sustenta por su calidad nutricional, fijación de nitrógeno, crecimiento, tolerancia a la sequía y adaptación al ramoneo es la especie utilizada con mayor éxito en sistemas silvopastoriles intensivos en las regiones tropicales y subtropicales como ha sido señalado para Venezuela ([Clavero, 1998](#)). Al respecto [Melo-Silva et al. \(2014\)](#), a partir de una investigación realizada en Brasil, plantean que esta especie reúne todos los atributos para ser considerada una planta invasora.

El establecimiento de leucaena en los sistemas de producción agropecuarios tropicales mejora las condiciones químicas de los suelos, constituyéndose una alternativa en suelos deficientes en nutrientes ([Razz & Clavero, 2006](#)). Además, [Urbano et al. \(2002\)](#) mencionan trabajos con leucaena en el sur del lago de Maracaibo, Venezuela, y destacan muy buenos resultados en las asociaciones con gramíneas.

No se encontró en la literatura informes del efecto biorregulador de *Trichoderma* sobre *C. odorata*. Sin embargo, sobre esta planta en la presente investigación en los tratamientos con este bioproducto se incrementaron las variables altura, número de hojas a los 60 y 90 días y biomasa seca de la parte aérea de la planta, por lo que esta podría ser una alternativa viable para el cedro, lo cual debe validarse en mayores extensiones en diferentes condiciones agroclimáticas.

El rápido desarrollo de samán se atribuye a que, como se conoce, esta es una planta que se desarrolla fácilmente bajo las condiciones de los llanos venezolanos, manifestando así una gran adaptabilidad en estas condiciones, lo cual se evidencia con el diámetro basal y la altura alcanzados, lo que también es apoyado por lo que se ha planteado con relación a la adaptabilidad de esta planta en la zona de Mantecal por [Inia \(2007\)](#) y a lo que contribuyó la presencia en las raíces de nódulos de *Rizhobium* sp.

Esto evidencia que se produjo un desarrollo acelerado de las posturas entre los 60 y 90 días, lo que se atribuye la gran adaptabilidad de la especie

a las condiciones del ensayo. Con relación a la gran adaptabilidad del samán, [Trujillo \(2009\)](#) señala que se establece a una altitud: entre 0 a 1300 msnm bajo un clima con temperatura media de 15 a 22°C, lluvia anual de 600 a 3000 mm, es resistente a condiciones de sequía y exigente al demandar luz.

El no incremento de biomasa seca en samán es lógico si se tiene en cuenta que la única variable que se incrementó con el biopreparado fue el diámetro basal y solo a los 60 días de edad, ya que a los 90 días este efecto bioestimulador no era evidente. En otras investigaciones realizadas con el samán en Venezuela no hubo incremento del número de hojas y la altura de la planta, a pesar de haberse incrementado el porcentaje de germinación en algunos pretratamientos a la semilla ([Ramírez et al., 2013](#)), lo que demuestra la alta capacidad de adaptación de esta planta forestal en estos ecosistemas.

Al analizar en su conjunto el efecto bioestimulador de las tres especies puede observarse que el tratamiento con *T. harzianum* provocó incrementos del diámetro basal a los 60 días para leucaena y samán, mientras que estimuló la altura a los 60 días y 90 días, el número de hojas a los 60 y 90 días y la materia seca del follaje para el cedro.

Para leucaena y samán se presentó un comportamiento similar con respecto al efecto de la bioestimulación (solo en el diámetro basal a los 60 días y no a los 90 días), aunque no se ha encontrado en la literatura información relacionada a esta situación, hay que tener en cuenta lo planteado con respecto a la rusticidad y adaptabilidad de leucaena y samán y además por ser leguminosas (familia *Fabaceae*), que tienen la posibilidad de fijar N atmosférico y entonces producirse a partir de la simbiosis de la planta con las bacterias nitrificantes naturales en el suelo, un desarrollo no controlado dentro de las variantes del experimento, lo cual no se produce en el cedro.

Al respecto efectos positivos, se informan en la literatura para otros forestales de la familia *Fabaceae*. [Ramírez et al. \(2015\)](#) verificaron un aumento

del diámetro basal con el empleo de *Trichoderma* en las tres plantas forestales que estudiaron de esta familia: yarúa, soplillo y albizia, mientras que [Romero et al. \(2008\)](#) observaron que *T. harzianum* tenía efecto promotor del crecimiento en plántulas de tres forestales de otras familias; *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex Maiden, *Eucalyptus globulus* Labill. (familia Myrtaceae) y *Pinus taeda* L. (familia Pinaceae); al igual que [Danoso et al. \(2008\)](#), quienes informaron incremento del desarrollo de *Pinus radiata* D. (familia Pinaceae) al aplicar una cepa de este antagonista en condiciones de vivero.

CONCLUSIONES

Los tratamientos con *Trichoderma* no incrementaron el porcentaje de germinación en cedro, samán y leucaena.

T. harzianum incrementó la altura, el número de hojas y la biomasa seca del área foliar en las plántulas de cedro, mientras que en leucaena y samán solo provocó incrementos del diámetro basal de las plántulas a los 60 días bajo las condiciones de los llanos de Apure en Venezuela.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bécquer C.J., Puentes A.B., Ávila U., Quintana M., Yaldreisy G.Y., Medinilla F., & Mirabales A. (1916). Efecto de la inoculación con *Bradyrhizobium* sp. y

- Trichoderma harzianum* en triticale (*X. Triticosecale* Wittmack), en condiciones de estrés por sequía. *Pastos y Forrajes*, 39(1), 19-26.
- Betancourt, A.** (2000). Árboles maderables exóticos en Cuba. La Habana: Editorial Científico Técnica. 352 p.
- Castillo, G., Gregori, B.S., Michelena, G., Díaz de Villegas, M.E.; Delgado, G., Montano, R., Cejas, G., & Gálvez, L.O.** (2007). Bioproductos para la agricultura: surgimiento y desarrollo en el ICIDCA. Sobre los derivados de la caña de azúcar. *Revista ICIDCA*, 41(3), 42-51.
- Cibrián, D., & Cibrián, J.** (2017). Estado del arte de la línea de investigación de plagas y enfermedades de importancia en viveros forestales. Texcoco, México: Red Temática en Salud Forestal.
- Costa, J.N.M.N., & Durigan, G.** (2010). *L. leucocephala* (Lam.) de Wit (*Fabaceae*): Invasora ou ruderal? *Revista Árvore*, 34(5), 825-833. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622010000500008>
- Clavero, T.** (1998). *Leucaena leucocephala*. Alternativa para la alimentación animal. Caracas: Fundación Polar, Universidad del Zulia-Centro de Transferencia de Tecnología en Pastos y Forrajes. 78 p.
- Díaz, M.C., & Ayala, J.L.** (2011). Influencia de *Trichoderma harzianum* a-34 en la germinación de las semillas de majagua (*Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell). *Fitosanidad*, 15(3), 159-161.
- Donoso, E., Lobos, G., & Rojas, N.** (2008). Efecto de *Trichoderma harzianum* y compost sobre el crecimiento de plántulas de *Pinus radiata* en vivero. *Bosque*, 29(1), 52-57. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000100006>
- Hernández L., & Seguí E.** (1997). Comportamiento de *Leucaena* spp en fase de vivero. *Pastos y Forrajes*, 20, 21-27.
- International Business Machines (IBM).** (2012). IBM SPSS Statistics for Windows. Version 21.0. New York: IBM Corp. Recuperado de: www.ibm.com/analytics/us/en/technology/spss/
- Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (Inia).** (2007). Caracterización socioeconómica del sector agrícola, Eje Norte llanero, Estado Apure. Maracay: Informe Técnico de Resultados del Subproyecto. Primera Versión. 53 p.
- Medina, M.C., Garcy, D.E., & Iglesias J.M.** (2007). Estudio comparativo de *Moringa oleifera* y *Leucaena leucocephala* durante la germinación y la etapa inicial de crecimiento. *Zootecnia Tropical*, 25(2), 83-93.
- Melo-Silva, C., Peres, M.P., Mesquita, J.E., Bastos, B., & Gonçalves-Barbosa, I.A.** (2014). Biología reproductiva de *L. leucocephala* (Lam.) R. de Wit (*Fabaceae*: Mimosoideae): sucesso de uma espécie invasora. *Neotropical Biology and Conservation*, 9(2), 91-97. DOI: <https://doi.org/10.4013/nbc.2014.92.03>
- Parra J., & Gámez L.** (2012). Determinación de especies arbóreas a través de caracteres vegetativos en la Estación Experimental Caparo, estado Barinas, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 56(2), 135-145.
- Ramírez, M., Mesa, J.R., & Soto R.** (2015). Alternativas agroecológicas en la producción de posturas de tres especies forestales en el municipio de Aguada de Pasajeros. *Agroecosistemas*, 3(1), 387-400.
- Ramírez, M., Urdaneta, A., Brigida Caraballo, B., & García, D.E.** (2013). Emergencia y desarrollo inicial de cuatro leguminosas forrajeras arbóreas presentes en la altiplanicie de Maracaibo, Venezuela. *Pastos y Forrajes*. 36(3), 303-312.
- Razz, R., & T. Clavero.** (2006). Cambios en las características químicas de suelos en un banco *Leucaena leucocephala* y en un mono cultivo de *Brachiaria brizantha*. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 23(3), 331-337.
- Romero, G., Crosara, A., & Baraibar A.** (2008). *Trichoderma harzianum* un biocontrol y biopromotor en vivero de especies forestales. *Ciencia e Investigación Forestal. Instituto Forestal*, 14(2), 335-345.
- Ruiz, T. E., & Febles, G.** (1987). *Leucaena* (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.) En: *Una opción para la alimentación bovina en el trópico y subtrópico*. La Habana: Editorial Edica. 200 p
- Rodríguez, A., Castellanos, L., Sevilla, J., Aro, V., & Peña, M.** (2013). Caracterización del agroecosistema de la parroquia Rincón Hondo del municipio Muñoz, estado Apure. *Agroecosistemas*, 1(2), 123-134.

Stefanova, M.M. (2007). Control de enfermedades fúngicas del suelo con biopreparados de *Trichoderma harzianum*. Curso internacional de sanidad vegetal. MINAG. pp.1-8.

Torres A., Vilanova, E., Ramírez H., Ninín B., Mora B., & Hernández D. (2011). Una propuesta para el desarrollo forestal a pequeña escala en el sur del estado Aragua, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 55(1), 47-60.

Trujillo E. (2009). Guía de reforestación. Segunda edición, ilustrada, aumentada y actualizada. Bogotá: Editorial Dayber. 255 p.

Urbano, D., Dávila, C., Saavedra S., Rivas N., & Morantes W. (2002). Impacto económico sobre la producción de leche en un sistema de pastoreo con asociaciones gramíneas leguminosas arbóreas en el sur del lago de Maracaibo. Venezuela. *Archivo Latinoamericano de Producción Animal*, 10(2), 102-116.

Valdés E. L. (2014). Caracteres principales, ventajas y beneficios agrícolas que aporta el uso de *Trichoderma* como control biológico. *Agroecosistemas*, 2(1), 254-264.



EFFECTO DE INCLUSIÓN DE ANTICOAGULANTES DURANTE EL BENEFICIO DE *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg.

Effect of inclusion of anticoagulants during the benefit of *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll. Arg.

Lina Paola Mendoza-Vargas¹ & Javier Alexander Jiménez-Forero²

Mendoza-Vargas, L.P., & Jiménez-Forero, J.A. (2018). Efecto de inclusión de anticoagulantes durante el beneficio de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. *Colombia Forestal*, 21(1), 91-101

Recepción: 10 de mayo de 2017

Aceptación: 28 de agosto de 2017

Resumen

Se evaluó el efecto de un agente anticoagulante del látex en el árbol de caucho (*Hevea brasiliensis*). Se caracterizó el contenido de sólidos totales (TSC) y contenido de caucho seco (DRC) del látex, se evaluaron cuatro tratamientos de anticoagulantes en campo: (T1) amoníaco, (T2) bórax, (T3) amoníaco-bórax y (T0) sin anticoagulante. En las láminas se evaluaron cinco diluciones (v/v) de látex en agua D1 (100 %), D2 (75 %), D3 (50 %), D4 (25 %) y D5 (0 %), a estas se hicieron pruebas de tensión, compresión y espesor. El látex caracterizado obtuvo TSC (37.1 % \pm 0.27), DRC (34.3 % \pm 0.19). Encontrándose en T3D1 mayor resistencia de tensión hasta punto de ruptura de 13.37 KgF, compresión de 5 KgF, y menor espesor de 1.52 mm, sin diferencia significativa entre los tratamientos T3 y T2 y las diluciones D1 a D2, posibilitando reducir el consumo de agua (25 %), y la producción de ripio (38 %) con anticoagulantes, sin afectar negativamente sus propiedades mecánicas.

Palabras clave: compresión, diluciones, espesor, látex, ripio, tensión.

Abstract

The effect of the inclusion in the field of an anticoagulant agent in the latex of the rubber tree (*Hevea brasiliensis*) was evaluated. The content of latex total solids (TSC) and dry rubber content (DRC) were characterized. Four treatments of anticoagulants were evaluated in the field: (T1) ammonia, (T2) borax, (T3) ammonia-borax, and (T0) without anticoagulant. Five dilutions (v/v) of the latex in water were evaluated in the rubber sheets, D1 (100%), D2 (75%), D3 (50%), D4 (25%) and D5 (0%). The obtained sheets were analyzed with tension, compression and thickness tests. The latex had a TSC of 37.1% (\pm 0.27), and a DRC of 34.3% (\pm 0.19). We found in T3D1 higher tensile strength up to breaking point of 13.37 KgF, compression of 5 KgF, and lower thickness of 1.52 mm, without significant differences between treatments T3 and T2 and dilutions D1 a D2, enabling to reduce the water consumption (25%), and the production of gravel (38%) with anticoagulants, without negatively affecting its mechanical properties.

Key words: compression, thickness, dilutions, latex, ripio, tension.

1 Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia. Lina.mendoza@unillanos.edu.co. Autor para correspondencia.

2 Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia. Jajimenez@unillanos.edu.co

INTRODUCCIÓN

El caucho natural es un producto que se obtiene por medio de la sangría de los vasos laticíferos presentes en diversas plantas. En Colombia se explota de manera comercial del árbol del caucho *Hevea Brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. (Quesada *et al.*, 2012; Departamento Nacional de Planeación, 2007) el látex extraído es una suspensión coloidal compuesta principalmente por agua (52-70 %) y el hidrocarburo conocido como elastómero o caucho natural (poli [cis-1,4-isopreno]) (27-45 %). Además, tiene otros componentes denominados constituyentes no caucho como ceniza, proteína, resina y azúcares (3-6 %) (Cáceres & Gauthler, 2012; Camacho *et al.*, 2014), su coloración es blanca, este se encuentra estabilizado por aniones carboxílicos adsorbidos en la superficie formados a partir de ácidos grasos y/o proteínas, los cuales ceden carga eléctrica negativa produciendo fuerzas de repulsión que impide la agregación de partículas, es decir, su coagulación.

Sin embargo, la acción bioquímica de enzimas y bacterias presentes naturalmente en la corteza después de la sangría producen la desestabilización de proteínas y fosfolípidos por acidificación del medio, bajando el pH hasta llegar al punto isoeléctrico donde se anula la carga, lo que disminuye las repulsiones electrostáticas entre las partículas produciendo la coagulación natural espontánea (Nawamawat *et al.*, 2011). Es por ello que, una vez finalizada la sangría, se procede a recolectar el látex en el menor tiempo posible para transportarlo hacia el beneficiadero, buscando evitar la formación de ripio y el espesamiento del látex indeseado por los productores de látex preservado y caucho en láminas, siendo importante el contenido de caucho seco (DRC) y contenido de sólidos totales (TSC), para lo cual corrigen el espesamiento con la adición de agua para disminuir la concentración del hidrocarburo. Este consumo de agua es adicional a la utilizada durante la etapa de dilución en proporción 1:1 antes de la acidificación; es decir, por cada litro de látex

procesado se adiciona un litro de agua para facilitar la formación del coagulo de laminación y disminuir el contenido de material no caucho en la lámina final, lo cual es una problemática ambiental y económica para el sector (Camacho *et al.*, 2014; Confederación Cauchera Colombiana, 2015a; Zuhainis *et al.*, 2015).

El DRC y el TSC son pruebas de caracterización fisicoquímicas de calidad realizadas al látex, indicadores de parámetro para el proceso de aprovechamiento ya que a partir de este se determina la cantidad de caucho que se obtiene de una muestra de látex (George *et al.*, 2013; Quesada *et al.*, 2014). Las propiedades mecánicas son cualidades importantes del caucho, el esfuerzo de deformación que se ejerce sobre este se presenta con fuerzas externas que se dirigen hacia el centro como lo es la compresión; mientras que en la tensión las fuerzas van hacia afuera hasta llegar al punto de ruptura del material. Estas propiedades se pueden ver afectas al adicionar agentes químicos durante el proceso de transformación como KOH utilizado para la eliminación de las proteínas (Rayas *et al.*, 2003; Peláez *et al.*, 2014).

La inducción de coagulación deliberada con la adición de agentes coagulantes, como el ácido fórmico o ácido acético, permite procesar el látex en diferentes presentaciones, ya sea como caucho seco en láminas de caucho secadas al aire, láminas de crepé, caucho técnicamente especificado (TSR) y ripio de bajo valor comercial para elaboración de productos como llantas, bolsas, suelas de zapato, partes de equipos plásticas, entre otros. La adición de anticoagulantes no es un proceso nuevo, este proceso se le conoce como *tapping*, usualmente se adiciona amoníaco en las tazas de recolección del látex, ya que evita la coagulación y es bactericida, muy utilizado para la producción de látex preservado, centrifugado y cremado, utilizado en la fabricación de globos, guantes, condones, moldes entre otros (Camacho *et al.*, 2014; Floriano *et al.*, 2014; Tamara *et al.*, 2015).

A nivel nacional, para el año 2014 se reportaron 50 225.1 ha de caucho de las cuales 3178.1

ha se encontraban en producción y 47 047.1 ha se encontraban en sostenimiento. Adicional a esto, 20 505.6 ha (41 %) son de pequeños productores, 13 914.7 ha (28 %) de medianos productores y 15 889.5 ha (31 %) de grandes productores. Sin embargo, existen 5791 pequeños productores que representan el 98.1 %, 104 medianos productores que representan el 1.8 % y 8 grandes productores que presentan el 0.1 % de los productores a nivel nacional, repartidos en 17 departamentos. Esta producción representaba 3549.9 t de coágulos de campo que equivalen a 2084.8 t de caucho seco, 379 332 l de látex preservado que equivalen a 125.2 t de caucho seco, 570.6 t de lámina y 251 t de subproducto de fondo de taza, ripio y orejas que equivalen a 95.3 t de caucho seco; produciéndose en total 2924.5 t de caucho seco ([Confederación Cauchera Colombiana, 2015b](#)). En el departamento del Meta en el mismo año se reportó 17 801.4 ha (35 %) del reporte nacional, de las cuales 892 ha estaban en producción y 10 909.1 ha estaban en sostenimiento; 1897.3 ha son de pequeños productores (10.6 %), 7660 ha de medianos productores (43 %) y 8244.1 ha de grandes productores (46.3 %); se estaba produciendo 321.1 t de coágulo de campo que equivalen a 186.2 t de caucho seco, 609 30 l de látex preservado que equivalen a 20.1 t de caucho seco; 41 t de lámina, 21.7 t en subproductos de fondo de taza, ripio y orejas que equivalen a 12.6 t de caucho seco, produciéndose en total 259.9 t de caucho seco, aportando el 8.8 % de la producción nacional ([Confederación Cauchera Colombiana, 2015a](#)).

En el contexto anterior, el objetivo de este trabajo consistió en determinar el efecto de la inclusión en campo de un agente anticoagulante en el espesor final de las láminas de caucho y sus propiedades mecánicas de tensión y compresión, además de la variación del porcentaje de dilución en agua durante el proceso de laminación, observándose adicionalmente el efecto en la formación de subproducto de campo como fondo de taza y ripio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se muestreó y seleccionó aleatoriamente látex del árbol de caucho (*Hevea Brasiliensis*) Clon FX3864 de seis meses de explotación con frecuencia de rayado de cada cuatro días, procedentes de un cultivo establecido en la finca Palmarito, vereda Quinquita del municipio de Paratebueno (Cundinamarca) Colombia, ubicada a 256 m de altitud, entre las coordenadas 4°38'85.70" latitud norte -73°20'92.85" longitud oeste, humedad relativa promedio de 75 %, 3900 mm precipitaciones anuales, temperatura promedio de 27°C y clima tropical.

Análisis de contenido de caucho seco (DRC) y contenido de sólidos totales (TSC)

La caracterización se realizó con los parámetros establecidos en la norma ASTM D1076-88 ([Cornish et al., 1988](#)). Finalizado el proceso de sangría se tomó una muestra de látex y se preservó con amoníaco al 5 % v/v. Para el análisis de DRC se obtuvo pesando 10 g de látex al que se adicionó solución de ácido fórmico al 5 % v/v hasta obtener coagulación, luego se laminó y se secó a 55°C hasta peso constante en un horno de convección natural. Luego, se calculó mediante la siguiente expresión:

$$DRC \% = \frac{B}{A} \times 100 \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

DRC: contenido de caucho seco.

A: peso de la muestra inicial.

B: peso del coágulo seco.

Para el TSC se pesaron 2.5 g de látex en una caja Petri y se secaron a 100°C hasta obtener peso constante en horno de convección natural, luego se utilizó la siguiente expresión.

$$TSC = \frac{C - A}{B - A} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde:

TSC: contenido de sólidos totales.

A: peso inicial de la caja Petri.

B: peso caja Petri más muestra de látex inicial.

C: peso caja Petri más muestra seca.

Cada ensayo se realizó por quintuplicado.

Anticoagulación en campo

El tamaño de muestra para la aplicación de los tratamientos de anticoagulación se definió con el 10 % de los árboles en producción. Se evaluaron cuatro tratamientos de anticoagulación: amoníaco (5 % v/v) (T1), bórax (4 % g/l) (T2), combinado amoníaco (5 % v/v)-bórax (4 % g/l) (T3), y el testigo sin preservación (T0), con tiempo de sangría de 2 h, 2 cm³ de cada tratamiento se aplicaron por aspersión antes de iniciar el proceso de rayado del árbol para la sangría del látex en taza. El ripio formado en las tazas después de la sangría se recolectó y se pesó; se registró la densidad con el instrumento hydrometer low S.T. de la marca Brixco Germany y el pH con el instrumento pH Metro digital, de la marca Sciennovo Instruments, a cada tratamiento tres horas después del inicio del proceso de sangría.

Proceso de producción de láminas

Para la producción de las láminas de caucho se adaptó el proceso planteado por la [Confederación Cauchera Colombiana \(2015a\)](#). El látex obtenido de cada tratamiento de preservación se recolectó en recipientes diferentes y se filtró para retirar impurezas. Se tomaron cinco muestras por 100 ml de cada tratamiento de anticoagulación en campo del látex y se evaluó el proceso de dilución en agua con relación a la dilución estándar (un litro de agua por litro de látex) variando la cantidad de agua requerida: D1 (100 % v/v), D2 (75 % v/v), D3 (50 % v/v), D4 (25 % v/v), D5 (0 % v/v) por cuadruplicado. La acidificación se realizó bajo el parámetro de 1 cm³ de ácido fórmico al 90 % por cada 2 litros de dilución. Al tratar con muestras

pequeñas de laminación se adicionó ácido fórmico comercial diluido al 5 % para facilitar su aplicación en dosis pequeñas calculados para cada ensayo de dilución de manera proporcional al parámetro en canoas de prueba de 5 cm de alto, 10 cm de largo y 7 cm de ancho en material aluminio para alimentos, sin adicionar más por la presencia del agente anticoagulante en el látex, asegurando un adecuado mezclado. El tiempo de coagulación fue de 24 h en moldes de aluminio para alimentos, la laminación se realizó con 3 pases y 3 torques en una laminadora artesanal.

Las láminas fueron escurridas por gravedad por un día y se trasladaron para secado en el horno de convección natural en las instalaciones de la Universidad de los Llanos, a una temperatura de 60°C hasta obtener peso constante.

Pruebas mecánicas a las láminas de caucho

Se determinó el espesor final de las láminas por quintuplicado mediante pie de Rey digital de la marca Caliper de 0-150mm. Se realizaron pruebas de tensión con láminas de 7 cm de largo por 3 cm de ancho y pruebas de compresión con el espesor obtenido, ejerciendo fuerza manual, utilizando el equipo Penetrómetro digital de la marca Mark-10 series 3, con los husillos gancho y cono respectivamente. Los datos fueron adquiridos por medio del software Mesur gauge Demo del equipo Mark 10 Serie 3 ([Mark 10 Team, 2016](#)). Al presentarse una relación directa o inversamente proporcional entre el espesor y las diluciones en cada tratamiento, se realizó una interpolación lineal a 2 mm de espesor.

Análisis estadístico

El diseño experimental fue de tipo factorial jerárquico balanceado. Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente por medio de un análisis de varianza (Anova) y prueba de comparaciones múltiples de Duncan a un nivel de confianza del 95 % utilizando el software Infostat versión libre ([Di Rienzo et al. 2001](#)).

RESULTADOS

Caracterización del látex

En la [tabla 1](#) se presentan los resultados de las pruebas establecidas en la ASTM D 1076 de contenido de caucho seco (DRC) y contenido de sólidos totales (TSC).

Tabla 1. Análisis de DRC y TSC.

TSC	DRC	Índice de sustancias diferentes a hidrocarburo de caucho: DRC-TSC
37.1 %±0.27	34.3 %±0.19	2.8 %±0.14

Anticoagulación en campo

Los resultados del proceso de anticoagulación en campo se presentan en la [tabla 2](#). La densidad del látex recolectado en cada tratamiento se mantuvo estable mientras que el testigo presentó una disminución, reflejado en la producción de ripio donde presentó la mayor formación. Esto indica que los tratamientos con anticoagulantes presentaron mayor estabilidad.

Tabla 2. Mediciones proceso de anticoagulación en campo.

Tratamiento	Densidad (g/ml)	pH	% de formación de Ripio
T0	0.97±0.02	6.9±0.1	52 %±0.25
T1	0.98±0.0	8.5±0.02	14 %±0.05
T2	0.98±0.0	7.8±0.05	13 %±0.06
T3	0.98±0.0	8.2±0.03	14 %±0.06

Medición de espesor

Al evaluar los tratamientos de anticoagulación con las diluciones ([figura 1](#)), se evidenció un menor espesor de lámina en el tratamiento T3 con D1 (100 % v/v) de 1.52mm, con diferencia significativas con respecto al tratamiento testigo T0 con D1

(100 % v/v) de 1.89 mm. El mayor espesor en la lámina se presentó con el tratamiento T0 con D5 (0 % v/v) de 2.45, mostrando un patrón de incremento del espesor al disminuir las diluciones en cada tratamiento. Sin embargo, no hubo diferencia significativa entre las diluciones D1 a D2 en cada tratamiento.

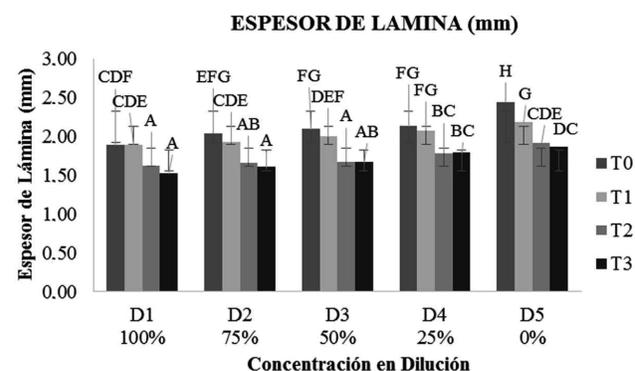


Figura 1. Mediciones de espesor en (mm) de láminas de caucho comparando tratamiento con diluciones; Duncan alfa: 0.05, error: 0.0096, grados de libertad: 57.

Pruebas mecánicas a las láminas de caucho

Los tratamientos evidencian una relación inversamente proporcional entre las diluciones y el espesor de las láminas procesadas. Es decir, a medida que disminuye el porcentaje de dilución aumenta el espesor de la lámina. Al no ser estándar el espesor en las láminas de todos los tratamientos y diluciones, se realizó una interpolación lineal a 2 mm de espesor para determinar el efecto de las pruebas mecánicas.

Al comparar los tratamientos de anticoagulación con las diluciones se evidenció una mayor fuerza de tensión de lámina en el tratamiento T3 con D1 (100 % v/v) de 13.37 KgF, con diferencias significativas con respecto al tratamiento testigo T0 con D1 (100 % v/v) de 11.9 KgF, la menor fuerza de tensión en la lámina se presentó con el tratamiento T0 con D5 (0 % v/v) de 8.51 KgF, presentándose un patrón de decrecimiento de la fuerza de tensión al disminuir las diluciones en cada

tratamiento. Sin embargo, no se presentan diferencias significativas entre las diluciones D1 y D2 de los tratamiento T1 a T3, a diferencias del tratamiento T0, que presentó diferencias significativas en estas diluciones (figura 2).

En la figura 3 se observa el punto de ruptura de las láminas al ejercer una fuerza manual de tensión con el equipo penetrómetro (husillo gancho), registrando los datos digitalmente con el software Mesur gauge Demo del equipo Mark 10 serie 3, obteniendo 10.2 KgF, correspondiente al rango del tratamiento T3.

Al comparar los tratamientos de anticoagulación con las diluciones se evidenció una menor resistencia a la compresión de la lámina en el tratamiento T3 con D1 (100 % v/v) de 5 KgF. La mayor resistencia a la compresión en la lámina se presentó con el tratamiento testigo T0 con D1 (0 % v/v) de 5.78 KgF; T0 con D5 (0 % v/v) de 6.22 KgF mostró la mayor resistencia a la compresión, evidenciando un patrón de incremento de la resistencia a la compresión al disminuir las diluciones en cada tratamiento. Por otro lado, se encontró que el tratamiento T3 presentó diferencia significativa en

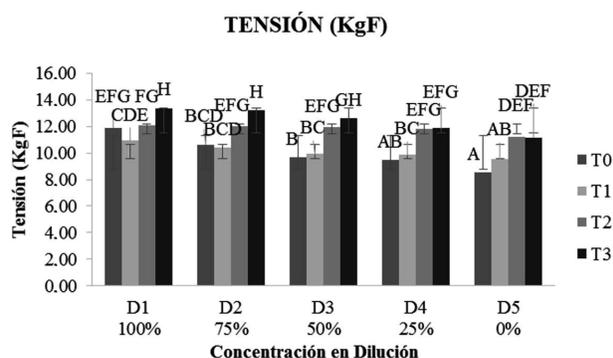


Figura 2. Resultados mediciones de tensión en (KgF) de láminas de caucho comparando tratamiento con diluciones; Duncan Alfa: 0.05 Error: 0.0140 grados de libertad: 57.

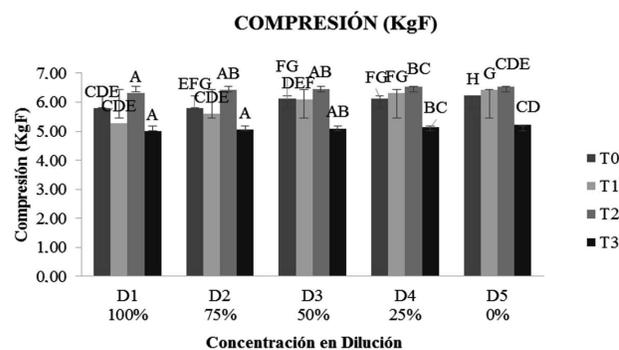


Figura 4. Resultados mediciones de compresión en (KgF) de láminas de caucho comparando tratamiento con diluciones; Duncan Alfa: 0.05 Error: 0.0096 grados de libertad: 57.

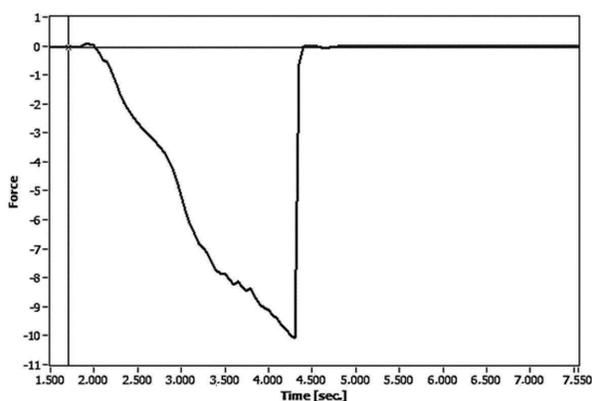


Figura 3. Comportamiento de la tensión de láminas de caucho hasta punto de ruptura en software Mesur gauge Demo del equipo Mark 10 Serie 3 Force (KgF), Time (segundos).

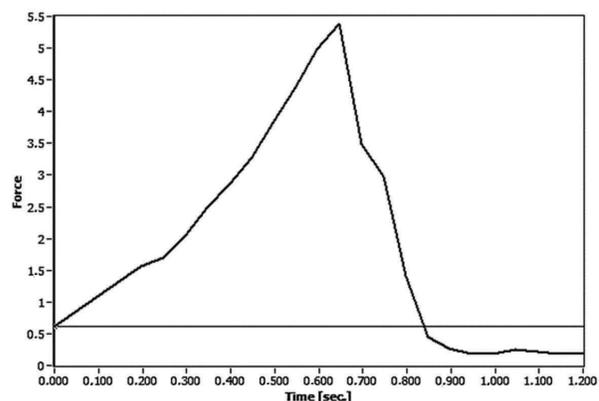


Figura 5. Comportamiento de la compresión de láminas de caucho hasta punto de ruptura en Software Mesur gauge Demo del equipo Mark 10 Serie 3, Force (KgF), Time (segundos).

todas las diluciones, mientras que los tratamientos T2 a T0 no presentaron diferencias significativas entre las diluciones D1 a D2 (figura 4).

En la figura 5 se observa el punto de ruptura de las láminas al ejercer una fuerza manual de compresión con el equipo penetrómetro (husillo cono) registrando los datos digitalmente con el software Mesur gauge Demo del equipo Mark 10 Serie 3, llegando hasta 5.45 KgF, rango del tratamiento T2.

DISCUSIÓN

Caracterización del látex

Los resultados obtenidos en la caracterización del látex del clon FX-3864 de seis meses de explotación reflejan un contenido de DRC de 34.3 ± 0.19 % y TSC 37.1 ± 0.27 %, con un índice de material diferente al caucho de 2.8 ± 0.14 . El látex naturalmente presenta variación en su composición coloidal ya sea por factores como condiciones del suelo del cultivo, clima, tiempo de explotación, bacterias y material vegetal empleado que afectan principalmente la composición en cuanto a DRC y TSC. Altos valores de DRC representan mayor productividad en el rendimiento de producción de caucho seco. Sin embargo, también representa un aumento en la viscosidad de la composición coloidal del látex que conlleva al taponamiento del manto laticífero producción obstrucción en la salida del látex del panel de sangría (Jacob *et al.*, 1989). El DRC del látex se encuentra en promedio entre el 27 y el 45 %, y el índice de material diferente al caucho (Diferencia entre el DRC y TSC) se encuentra entre el 3 y 6 % (Cáceres & Gauthler, 2012; Camacho *et al.*, 2014); esto indica que la caracterización realizada se encuentra dentro de los parámetros de composición. En el estudio de caracterización de dos parámetros del látex de clones de *Hevea Brasiliensis* realizado por Quesada *et al.* (2012) se evaluaron los clones RRIM 600, IAN 873 y FX 3864 ubicados en la altillanura colombiana, con tres años de explotación. El clon FX 3864 presentó un

TSC de 36.8 % y DRC de 35.6 % con una diferencia de 1.2, valores similares presentados con el evaluado en esta investigación en el cultivo de seis meses de explotación. Los otros Clones RRIM 600 e IAN 837 presentaron valores de DRC de 42.7 y 41.3, y TSC de 45.5 y 43.8 respectivamente superiores, siendo material vegetal diferente.

Anticoagulación en campo

En el proceso de campo, la densidad registrada para los tratamientos con anticoagulante T1, T2 y T3 fue de 0.98 ± 0.0 g/cm³ tomada durante la recolección, tres horas después de iniciada la sangría, con un pH de 8.5 ± 0.02 , 7.8 ± 0.05 y 8.2 ± 0.03 , respectivamente. Mientras que el tratamiento testigo T0, la densidad disminuyó a 0.97 ± 0.2 g/cm³ y pH de 6.9 ± 0.1 . La adición de un agente anticoagulante como el amoníaco en el proceso de tapping previene que las bacterias presentes en el panel de sangría acidifiquen el látex, estabilizando la suspensión (Krickl *et al.*, 2017), mientras que el bórax presenta la propiedad preservante evitando la descomposición por bacterias del látex (Confederación Cauchera Colombiana, 2015a). El pH comercial del látex preservado se encuentra alrededor de 10.08 con una densidad de 0.98g/cm³ (Parra *et al.*, 2005), siendo evidente que en el tratamiento T0, testigo, inició la coagulación natural del látex que produce al finalizar el proceso de sangría, fondo de taza o ripio de bajo valor comercial que disminuye la producción al no ser incorporado en procesos como laminado o preservación del látex por afectar su calidad (Riyajan & Santipanuspun, 2010; Tavera *et al.*, 2012; Peláez *et al.*, 2014).

El costo en el mercado de ripio se encuentra alrededor de \$2000 Kg seco, la lámina se encuentra alrededor de \$4000 Kg, mientras que el látex esta alrededor de \$1200 Kg; con la aplicación de un anticoagulante se redujo en un 38 % la producción de ripio que tiene un costo de inversión de aplicar 2 cm³ de anticoagulante en taza es de \$8 pesos con amoníaco, \$1.5 pesos con bórax y \$5.25 pesos un combinado de estos anticoagulantes.

Es decir, si un productor mensualmente recolecta 100 kg de caucho seco, 38 % adicional se produciría en ripio de 400 árboles con rayado cada cuatro días, siete veces al mes se gastaría \$22 400 con el anticoagulante de mayor costo expuesto anteriormente. Venderlo en ripio representaría una ganancia de \$76 000, mientras que venderlo en lámina representaría \$129 600 incluido el costo de la aplicación del anticoagulante, es decir, más del 42 % de recuperación de ganancias, mientras que en látex \$91 600 incluido el costo, es decir el 17 % de recuperación con los precios del mercado actual.

Medición de espesor

Aunque es muy poca la literatura de investigación en el efecto que se produce al aplicar un agente anticoagulante con la variación de los porcentajes de dilución en el espesor y las propiedades mecánicas de la laminación, los resultados permiten evidenciar un efecto bajo estas circunstancias.

Durante el proceso de producción de láminas de caucho, la adición de un componente ácido permite que las partículas de caucho dispersas en la solución coloidal se agrupen y formen los coágulos de caucho de laminación, siendo entonces la dilución con la adición de agua un factor importante que permite que los componentes no elastómeros se separen y el ácido actúe homogéneamente en la formación del coágulo de caucho; el exceso de agua queda atrapado en su interior y es removido junto con los otros componentes (Enciso *et al.*, 2014; Peláez *et al.*, 2014; De oliveira *et al.*, 2015). En primera instancia, teniendo en cuenta los resultados en la *figura 1*, la variación de la dilución tiene una relación inversamente proporcional con el espesor de las láminas obtenidas. Es decir, a medida que se disminuye el porcentaje de dilución aumenta el espesor manteniendo la igualdad en el tamaño de las canoas de coagulación. La diferencia presentada entre tratamiento puede estar relacionado con la presencia de los cristales de bórax como preservante; los tratamientos T2 y T3 con presencia de

este componente presentaron menor espesor en las láminas, lo que indica que existe una relación estructural favorable en las láminas producidas. De acuerdo con Camacho *et al.* (2014), la presencia de minerales o impurezas afecta las propiedades del caucho; al ser el bórax utilizado como preservante del caucho presenta una compatibilidad que pudo generar enlaces químicos que permitieron que los coágulos de caucho se formaran lentamente sin generar fuertes aglomerados, facilitando la reducción del espesor en el laminado. Sin embargo, no hay diferencia significativa entre las diluciones D1 y D2, lo que permite inferior que se puede reducir este parámetro en un 25 %.

Pruebas mecánicas a las láminas de caucho

Dado que el espesor es un parámetro no controlable por las diferentes diluciones aplicadas, se realizó una interpolación lineal a 2 mm de espesor con cada uno de los resultados de las pruebas mecánicas de tensión y compresión.

La tensión se evaluó sometiendo las láminas de caucho a fuerzas opuestas hasta obtener el punto de ruptura de la lámina y para la compresión se aplicaron fuerzas hacia el centro de la lámina hasta obtener el punto de ruptura. El caucho tiene la particularidad de que al ceder a la fuerza de deformación a la cual está siendo expuesta de forma instantánea y recupera su forma por ser un material elástico (Arguello & Santos, 2016). Sin embargo, la ley de Hooke no es válida en este tipo de materiales ya que no exhiben una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria, la recuperación no se realiza de la misma trayectoria con la que tuvo la deformación (Hibbeler *et al.*, 2006). De acuerdo con el módulo de Young, para materiales poliméricos no homogéneos, las fuerzas de tensión y compresión no son iguales y la fuerza sobre el objeto es proporcional a su elongación (Young & Eichhorn, 2007). En la *figura 2* se observa la deformación por fuerzas de tensión en la lámina hasta el punto de ruptura, la fuerza de tensión se representa en el plano de manera negativa mientras que

en la [figura 4](#) la compresión se representa de forma positiva. Al efectuarse el punto de ruptura se termina la fuerza de deformación en la lámina, la cual presenta por sus propiedades elásticas; las partículas tienden a organizarse, volviendo a recuperar su forma inicial ([Kane & Sternheim, 2007](#)). Los resultados de las pruebas mecánicas evidencian que se presenta mayor tensión y menor compresión con el tratamiento T3 combinado entre amoníaco-bórax, sin presentarse diferencias significativas entre las diluciones D1 a D2 ([figuras 2 y 4](#)), resultados que evidencian diferencias con el tratamiento testigo T0; la reducción de la compresión representa menor fuerza de extrusión de los equipos en el proceso de transformación industrial, mientras que la tensión evidencia un aumento en la resistencia del punto de ruptura.

Diferentes investigaciones han evaluado el efecto de la adición de partículas sobre las propiedades de los compuestos de caucho natural (NR). [Vélez et al. \(2016\)](#) estudiaron la adición de partículas micrométricas de gilsonita reforzado con N330, comparando el efecto de sistemas de vulcanización convencionales y eficientes; encontraron que la adición de gilsonita facilitaba la incorporación de negro de carbono durante el mezclado, disminuyendo la reversión durante ensayos reométricos de compuestos con sistemas de curado de vulcanización eficaces y aumentando la resistencia dieléctrica. Por otro lado, [Flauzino Neto et al. \(2016\)](#) añadieron nanocristales de celulosa hallando un incremento de la resistencia a la deformación elástica desde 0.19 Mpa (NR) hasta 0.54 Mpa y en la dureza desde 0.59 (NR) hasta 3.03 Mpa cuando hay inclusión del 5 % de nanocristales. Lo que indica que la adición de componentes al caucho representa una variación en las propiedades mecánicas de las láminas.

Aporte ambiental

En cuanto al beneficio de reducir el consumo de agua, una reducción del 25 % solo para la producción del departamento del Meta (que se encuentra

alrededor de 41 toneladas de lámina al año, que equivalen aproximadamente a 102 500 litros de látex al año) equivale a alrededor de 25 625 litros de agua. A nivel nacional, donde se producen 570.6 toneladas de lámina al año que equivalen aproximadamente a 1 426 500 litros de látex al año, se reduciría alrededor de 356 625 litros de agua, que no se convertirán en aguas residuales con un pH inferior al 2 por acción de los ácidos utilizados en el proceso, y que por esta condición genera acidificación de las fuentes hídricas y los suelos si no se realiza tratamiento ([Kornochalert et al., 2014](#)).

CONCLUSIONES

Las interacciones realizadas con la aplicación de anticoagulantes en campo y la variación de la dilución en el proceso de laminado permitieron concluir que existe una mayor resistencia de tensión hasta punto de ruptura de 13.37 KgF, compresión de 5 KgF y menor espesor de 1.52 mm con el tratamiento T3D1. Sin embargo, estadísticamente no hay diferencia significativa entre los tratamientos T3 y T2, con una reducción de formación de ripio del 38 %, y las diluciones D1 y D2, con una reducción del consumo de agua del 25 %, demostrando la importancia en el estudio de la inclusión de anticoagulantes no solo para la reducción del consumo de agua durante el procesamiento, también para evitar reprocesos asociados a la contaminación de las láminas ocasionadas por la coagulación en campo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo Social de Educación Superior del Meta (FSES) y a la Gobernación del Meta, en el marco del proyecto "Fortalecimiento de las capacidades de investigación en ciencia y tecnología e innovación del departamento del Meta 2015", a través del apoyo de créditos-beca-pasantía para jóvenes investigadores.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arguello, J.M., & Santos, A.** (2016). Hardness and compression resistance of natural rubber and synthetic rubber mixtures. *Journal of Physics: Conference Series* 687(1), 012088. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/687/1/012088>
- Cáceres Sandoval, A.P., & Gauthier Maradei, P.** (2012). Análisis termogravimétrico como un nuevo método para la determinación de contenido de sólidos totales (CST) y caucho seco (CCS) del látex natural. *ION*, 25(2), 57-65.
- Camacho Támara, A. M., Reyes Pineda, H., & Lozano Bohórquez, A.** (2014). Análisis y caracterización fisicoquímica del látex de caucho especie *Hevea Brasiliensis*. *Tumbaga*, 1(9), 83-97.
- Confederación Cauchera Colombiana.** (2015a). Manual práctico para el rayado de árboles de caucho. Bogotá: Confederación Cauchera Colombiana. 35 p.
- Confederación Cauchera Colombiana.** (2015b). Informe de resultados, censo de plantaciones de caucho natural (*Hevea brasiliensis*). Bogotá: Confederación Cauchera Colombiana. 30 p.
- Cornish, K., Xie, W., Williams, J., Nguyen, K., & Kostyal, D.** (1988). ASTM D 1076 Standard specification of rubber-concentrated, ammonia preserved, creamed and centrifuged natural latex. Philadelphia: International Standards Worldwide. 9 p.
- De Oliveira Reis, G., Menut, P., Bonfils, F., Vaysse, L., Hemar, Y., & Sanchez, C.** (2015). Acid-induced aggregation and gelation of natural rubber latex particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and*

Engineering Aspects, 482, 9-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.04.015>

- Departamento nacional de planeación (DNP).** (2007). Agenda interna para la productividad y la competitividad amazonoquía. Bogotá: DNP. 80 p.
- Di Rienzo, J., Balzarini, M., Gonzalez, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Robledo, C.** (2001). Software Estadístico Infostat. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado de: <https://www.infostat.com.ar>.
- Enciso, J. L., Llano, J. F., Graciano, N., & Olaya, C.** (2014). Diseño y construcción de un prototipo tren de laminación y caracterización de láminas de látex. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 86-92.
- Flauzino Neto, W. P., Mariano, M., da Silva, I. S. V., Silvério, H. A., Putaux, J.-L., Otaguro, H., & Dufresne, A.** (2016). Mechanical properties of natural rubber nanocomposites reinforced with high aspect ratio cellulose nanocrystals isolated from soy hulls. *Carbohydrate Polymers*, 153, 143-152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.073>
- Floriano, J. F., da Mota, L. S. L. S., Furtado, E. L., Rossetto, V. J. V., & Graeff, C. F.** (2014). Biocompatibility studies of natural rubber latex from different tree clones and collection methods. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 25(2), 461-470. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10856-013-5089-9>
- George, N. A., Peethan, A., & Vijayan, M.** (2013). A simple optical sensor for the measurement of dry rubber content in natural rubber latex. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 28(4), 313-320. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2013.785545>
- Hibbeler, R.C.** (2006). Mecánica de materiales. México D.F.: Pearson Educación. 896p.
- Jacob, J., Prevot, J., Roussel, D., Lacrotte, R., Serres, E., D'Auzac, J., Eschbach, J., & Omont, H.** (1989). Yield limiting factors, latex physiological parameters, latex diagnosis and clonal typology. En J. D'Auzac, J. Jacob & H. Chrestin (eds.), *Physiology of rubber tree latex* (pp. 346-381). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kane, J.W., & Sternheim M.M.** (2007). *Física*. Amherst, Massachusetts: Reverte S.A. 795p.

- Kornochalert, N., Kantachote, D., Chaiprapat, S., & Techkarnjanaruk, S.** (2014). Bioaugmentation of latex rubber sheet wastewater treatment with stimulated indigenous purple nonsulfur bacteria by fermented pineapple extract. *Electronic Journal of Biotechnology*, 17(4), 174-182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2014.06.003>
- Krickl, S., Touraud, D., & Kunz, W.** (2017). Investigation of ethanolamine stabilized natural rubber latex from *Taraxacum kok-saghyz* and from *Hevea brasiliensis* using zeta-potential and dynamic light scattering measurements. *Industrial Crops and Products*, 103(1), 169-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.046>
- Mark 10 Team.** (2016). Mesur gauge Demo Mark 10 Series 3. EE. UU.: Mark 10 Corporation. Recuperado de: www.mark-10.com.
- Nawamawat, K., Sakdapipanich, J.T., Ho, C.C., Ma, Y., Song, J., & Vancso, J.G.** (2011). Surface nanostructure of *Hevea brasiliensis* natural rubber latex particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 390(1), 157-166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.09.021>
- Parra, D.F., Martins, C.F.P., Collantes, C.H., & Lugao, A.B.** (2005). Extractable proteins from field radiation vulcanized natural rubber latex. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 236(1), 508-512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.04.028>
- Peláez, G.J., Velásquez, S.M., & Giraldo, D.H.** (2014). Aditivos para el procesamiento del caucho natural y su aplicación en pequeñas plantaciones de caucho. *Informador Técnico (Colombia)*, 78(2), 166-174.
- Quesada, I., Aristizábal, F., & Montoya, D.** (2012). Caracterización de dos parámetros del látex de clones de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Mull. Arg. En la altillanura Colombiana. *Colombia Forestal*, 15(1), 139-146. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2012.1.a06>
- Rayas, J., Rodríguez Vera, R., & Martínez, A.** (2003). Medición del módulo de Young en el hule látex usado ESPI. *Mexicana de Física*, 49(6), 555-564.
- Riyajan, S.A., & Santipanusopon, S.** (2010). Influence of ammonia concentration and storage period on properties field NR latex and skim coagulation. *KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe*, 63(6), 240-245.
- Tamara, A.M.C., Pineda, H.R., & Bohórquez, A.L.** (2015). Análisis y caracterización fisicoquímica del látex de caucho especie *Hevea brasiliensis*. *Revista Tumbaga*, 1(9), 83-97.
- Tavera, C.P., & Gauthier, P.** (2012). Estudio experimental de las etapas de cremado y separación de un proceso de producción de látex natural cremado. *ION*, 25(1), 7-15.
- Vélez, J.S., Velásquez, S., & Giraldo, D.** (2016). Mechanical and rheometric properties of gilsonite/carbon black/natural rubber compounds cured using conventional and efficient vulcanization systems. *Polymer Testing*, 56(1), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.09.005>
- Young, R.J., & Eichhorn, S.J.** (2007). Deformation mechanisms in polymer fibres and nanocomposites. *Polymer*, 48(1), 2-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.11.016>
- Zuhainis, S.W., Hassan, A.A., Singh, M., & Mohamad, R.** (2015). Microbial Surfactant for Preservation of Natural Rubber Latex. *Beneficial Microorganisms in Agriculture, Aquaculture and Other Areas*, 29 (1), 101-128. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23183-9_6

INTERPOLACION REGNIE PARA LLUVIA Y TEMPERATURA EN LAS REGIONES ANDINA, CARIBE Y PACÍFICA DE COLOMBIA

Regnie interpolation for rain and temperature in the andean, caribbean and pacific regions of Colombia

Diego Fernando Alzate Velásquez¹, Gustavo Alfonso Araujo Carrillo², Edwin Oswaldo Rojas Barbosa³, Douglas Andrés Gómez Latorre⁴ & Fabio Ernesto Martínez Maldonado⁵

Alzate-Velásquez, D.F., Araujo-Carrillo, G.A., Rojas-Barbosa, E.O., Gómez-Latorre, D.A., & Martínez-Maldonado, F.E. (2018). Interpolacion Regnie para lluvia y temperatura en las regiones Andina, Caribe y Pacífica de Colombia. *Colombia Forestal*, 21(1), 102-118

Recepción: 20 de febrero de 2017

Aprobación: 28 de agosto de 2017

Resumen

Se utilizó el modelo regionalizado de lluvia Regionalisierte Niederschlage (Regnie) para interpolar la lluvia y temperatura media del aire de las regiones Andina, Caribe y Pacífica de Colombia. Este modelo integró los datos de la pendiente y exposición del terreno obtenidos del modelo digital de elevación, así como los promedios climatológicos de 1440 series de precipitación y 258 series de temperatura registradas en igual número de estaciones meteorológicas de superficie para cada variable. Se establecieron los modelos de regresión lineal múltiple de la precipitación media anual y temperatura media anual del aire, además se utilizaron herramientas de geoprocésamiento para la generación de las superficies interpoladas. Los estadísticos de prueba de las superficies Regnie fueron similares a los obtenidos con interpolaciones con los métodos Spline e IDW para precipitación (coeficiente de determinación 0.81 y error medio de 55.6 mm) y mejores para la temperatura media (coeficiente de determinación 0.99 y error medio de 0.02°C).

Palabras clave: análisis espacial, lenguaje R, MDE, métodos determinísticos, precipitación, temperatura del aire.

Abstract

A regionalized rain interpolation model: Regionalisierte Niederschlage (REGNIE) was implemented to interpolate rain and average air temperature for the Andean, Caribbean and Pacific Regions in Colombia. This model integrated terrain slope and aspect obtained from the digital elevation model and the climatological average of 1440 precipitation time series and 259 temperature time series registered in the same number of weather stations for each variable. Multiple linear regression models of annual rainfall and annual average air temperature were obtained according to the model and geoprocessing tools were used for the generation of interpolated surfaces. Statistical results of REGNIE surfaces were similar to those obtained with SPLINE and IDW methods for precipitation (determination coefficient of 0.81 and 55.6 mm mean error) and better for average

1 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera, Colombia. dfalzate@corpoica.org.co Autor para correspondencia.

2 Corpoica. Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera, Colombia. garaujo@corpoica.org.co

3 Corpoica. Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera, Colombia. eorojas@corpoica.org.co

4 Corpoica. Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera, Colombia. dgomez@corpoica.org.co

5 Corpoica. Centro de Investigación Tibaitatá. Mosquera, Colombia. femartinez@corpoica.org.co

mean temperature (coefficient of determination 0.99 and average error of 0.02 °C).

Key words: spatial analysis, R language, DEM, deterministic methods, rainfall, air temperature.

INTRODUCCIÓN

Modelos de predicción espacial como la distancia inversa, Kriging, curvatura mínima, triangulación o funciones de base radial se han utilizado para generar superficies continuas a partir de datos climáticos provenientes de un número discreto de puntos de medición (Mejía *et al.*, 1999; Sluiter, 2009; Hengl, 2009). Estas metodologías buscan generar superficies climáticas en un área de interés a partir de las mediciones en ciertos puntos, en algunos casos integrando variables topográficas o geográficas (Agnew & Palutikof, 2000; Ninyerola *et al.*, 2000; Marquinez *et al.*, 2003).

Dentro de los modelos de predicción espacial es posible hablar de dos enfoques: determinístico y probabilístico. El determinístico es de carácter empírico tradicional y se encuentra ampliamente instrumentalizado en modelos mecánicos como los polígonos de Thiessen (también conocido como vecino más cercano o diagramas de Voronói), red de triángulos irregulares (TIN por sus siglas en inglés), distancia inversa ponderada (IDW por su sigla en inglés), funciones polinomiales (Spline) o de regresión lineal y redes neuronales (Sluiter, 2009; Hengl, 2009).

Los modelos determinísticos suelen tener desventajas frente a los probabilísticos de tipo geostatístico (como el Kriging), en especial porque no incluyen los errores de los valores esperados (Giraldo, 2000). Sin embargo, su simplicidad los hace útiles y en algunos casos con rendimiento tan bueno o mejor que los estocásticos (Hengl, 2009; Rauthe *et al.*, 2013). En general, existe controversia respecto al mejor método para generar superficies climáticas a partir de un conjunto limitado de puntos de observación (Bustamante, 2003), razón por la que la elección del método debe ser cuidadosa (Montoya *et al.*, 2000). Se deben analizar

las variantes de los métodos, la distribución espacial de las observaciones, las características del área de estudio, así como la naturaleza y resolución temporal y espacial de la variable climática que se desea interpolar (Montoya *et al.*, 2000). Por ejemplo, la precipitación en las regiones Andina y Caribe de Colombia es modulada temporalmente por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), pero factores orográficos como la elevación y orientación de las pendientes determinan la circulación de los vientos, formación de nubes y finalmente la distribución espacial de las lluvias (Mesa *et al.*, 1997).

Se han utilizado diferentes aproximaciones para generar superficies climáticas continuas en Colombia. Saavedra e Izquierdo (1993), citados por Montoya *et al.* (2000), usaron los métodos Spline y Kriging, respectivamente, para interpolar totales anuales de precipitación. Mejía *et al.* (1999) aplicaron con deriva externa para la precipitación media anual y Kriging ordinario para la escala media mensual. Montoya *et al.* (2000) emplearon el método de Gandin, una extensión del método de aproximación polinomial propuesto por Cressman (1959) para la precipitación. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -Ideam (2005), representó en su atlas climatológico isolíneas o isoregiones de las principales variables climáticas usando el método IDW, desarrollado inicialmente por Shepard (1968).

El modelo de lluvia regionalizada, Regnie, es un modelo determinístico, desarrollado a partir de estudios de la influencia de la topografía en la hidrología e hidrometeorología (Rauthe *et al.*, 2013), utilizado por el Servicio Meteorológico (Abteilung Hydrometeorologie, 2013) y la comunidad climatológica e hidrológica en Alemania (Schwitalla *et al.*, 2008; Grasselt *et al.*, 2008; Photiadou *et al.*, 2011; Bellprat *et al.*, 2012; Kotlarski *et al.*,

2012; Berg *et al.*, 2013). El modelo Regnie es una combinación entre un modelo de regresión lineal múltiple y el IDW (Buishand *et al.*, 2008). Se basa esencialmente en usar datos puntuales de variables climáticas como precipitación o temperatura con su respectiva ubicación geográfica (latitud-longitud) y datos fisiográficos de estas ubicaciones como la elevación, la pendiente y la exposición del terreno, para calcular cocientes con una regresión lineal múltiple (RLM), que son multiplicados por los coeficientes de la regresión para obtener espacialmente la variable climática en una región deseada (Soenario *et al.*, 2010). Regnie es considerado de carácter global porque recurre a información externa (v. gr. modelos digitales de elevación [MDE]), y crea modelos de dependencia entre los datos climáticos analizados (Saz *et al.*, 2010).

El propósito de este trabajo fue aplicar y evaluar el modelo Regnie para establecer si se ajusta a las condiciones geográficas y climáticas de Colombia, comparándolo con otros métodos determinísticos como IDW o Spline; así mismo, identificar las ventajas y desventajas de su aplicación y determinar la viabilidad de su utilización en el mapeo y estudios de caracterización climática en el país. La implementación de este método es viable y promete buenos resultados, dado que en la actualidad es posible generar superficies fisiográficas de elementos de fácil acceso, como aquellos derivados de los MDE, que pueden ser utilizados para mejorar la generación de superficies climáticas, pues estos elementos tienen influencia directa en la distribución espacial de variables climáticas en regiones montañosas.

La importancia del estudio radica en la obtención de datos e información climática con mayor resolución espacial y precisión, con la cual se podría generar información para aquellas áreas en las que no se dispone de registros climáticos y se puede mejorar el conocimiento de patrones espaciales de comportamiento de los elementos climáticos en el país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio utilizada corresponde a los departamentos de las regiones Andina, Pacífica y Caribe de Colombia, con un área de 481 312 km² (figura 1). Se utilizó el promedio multianual para el periodo 1980-2011 de 1440 estaciones con datos de lluvias y 258 estaciones con datos de temperatura media del aire. Estos promedios fueron contruidos con las series históricas mensuales de las estaciones disponibles dentro del área de estudio que aprobaron controles de calidad, incluyeron filtros gruesos, coherencia estadística y espacial, además que hayan sido sometidas a la generación de datos faltantes mediante el método de las

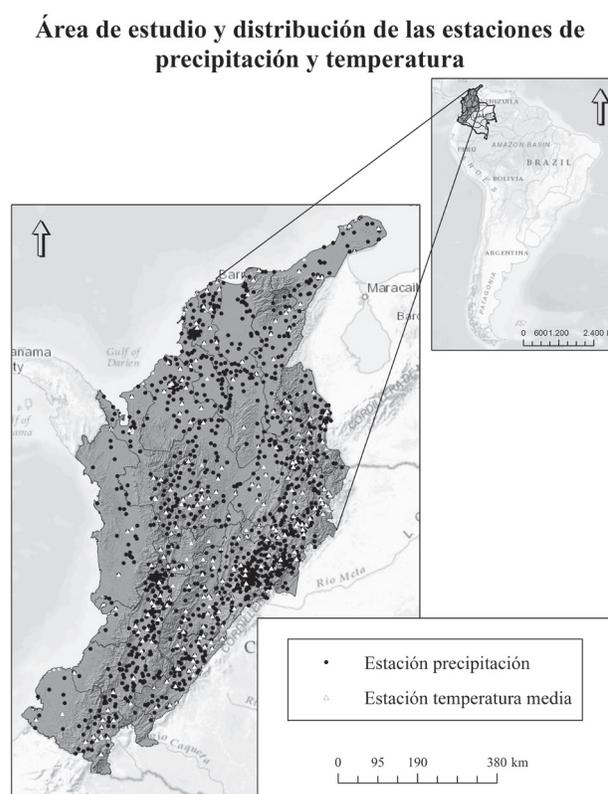


Figura 1. Área de estudio y distribución de las estaciones con promedios de precipitación y temperatura.

proporciones (Guijarro, 2014) y a pruebas de homogeneidad como el test SNHT (Standard Normal Homogeneity Test; Alexandersson, 1986) y el test de McCuen (McCuen, 1998).

Materiales y equipos

Los materiales y equipos empleados en el trabajo fueron los siguientes (tabla 1).

Métodos

Se siguió el modelo Regnie descrito por Rauthe *et al.* (2013), que incluyó dos etapas: primero, el cálculo de las variables geográficas-fisiográficas y, segundo, el cálculo espacial de la precipitación y temperatura media del aire.

Cálculo de las variables geográficas-fisiográficas

El cálculo de estas variables se fundamenta en una RLM (ecuación 1).

$$y_i = a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + a_3x_{i3} + a_4x_{i4} + a_5x_{i5} + \varepsilon_i$$

ecuación 1

Donde,

Y_i = variable de un objeto en la estación i .

a_{ik} = coeficiente de regresión en la ecuación i para la variable k .

x_{ik} = k variables en la estación i con $x_{i1} = 1$.

ε_i = proporción aleatoria de y_i o residuo.

Las cinco variables (k) determinadas por factores geográficos y fisiográficos son:

- Latitud y longitud (m).
- Elevación (m).
- Pendiente y exposición del terreno en el punto de la estación (°).

Se generaron las derivadas primarias del MDE de 30 metros, que corresponden a la pendiente y exposición; así como los continuos de latitud y longitud para las 1440 estaciones con datos de precipitación y 258 con datos de temperatura media del aire. Tras lo anterior, se obtuvieron las cinco variables necesarias para la RLM en el caso de precipitación (latitud, longitud, elevación, pendiente y exposición del terreno) y las tres para la temperatura media (latitud, longitud y elevación), representando cada una un ráster o superficie que hizo parte del cálculo de la ecuación de regresión lineal resultante.

La pendiente y exposición del terreno, variables consideradas parámetros morfométricos o primarios del terreno, fueron derivadas del MDE, del cual también se obtuvo la altitud (Hengl *et al.*, 2003; Hengl & Reuter, 2008). La pendiente indicó la relación de cambio en elevación en una dirección XY. La exposición del terreno hizo referencia a la dirección o ángulo azimutal de la inclinación de la pendiente (Hengl *et al.*, 2003).

Posteriormente, se calcularon de forma puntual los valores de latitud, longitud, elevación, pendiente y exposición del terreno para cada estación

Tabla 1. Materiales y equipos empleados en el trabajo

Material-equipos	Descripción
Programas	Sistema operativo Windows 8™. Software R (R Development Core Team, 2008) con la interfaz R Studio y los paquetes: dplyr, fields, ggplot2, gstat, sp, maptools, raster, rgdal, rgeos.
Archivos digitales	Promedios anuales de precipitación y temperatura del aire para cada estación digitalizados en formato *.shp. MDE SRTM de 30 m en formato *.img. Mapa de límites departamentales en formato *.shp.

analizada, con el fin de generar el modelo de RLM para precipitación y temperatura media utilizando el programa R. Se aplicó la técnica de mínimos cuadrados al modelo de RLM para obtener los coeficientes de regresión y con ellos se calcularon los residuos mediante la [ecuación 1](#). Los estadísticos de la RLM que permitieron valorar el modelo fueron el coeficiente de determinación (R^2), con rango entre 0 y 1 (1 indica una correlación perfecta de la muestra) y el estadístico F, que indica si la relación observada entre las variables dependientes y la independiente es producto del azar. Para completar el cálculo, los residuos de la RLM fueron interpolados de forma ponderada (IDW) con la [ecuación 2](#):

$$\tilde{z}_i = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{z_k}{d_{ki}^2}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{d_{ki}^2}} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde,

\tilde{z}_i =valor interpolado para el ráster (vacío) i.

z_k =residuo para el ráster (lleno) k .

d_{ki} =distancia entre los puntos centrales del ráster k e i.
 n =número de estaciones cercanas que se utilizarán en la interpolación.

Se realizó la interpolación del residuo de cada estación de forma ponderada, tal como se expresó en la ecuación 2.

Cálculo de la precipitación y temperatura media del aire

Se procedió a obtener la superficie de precipitación mediante la multiplicación de los coeficientes de la RLM con las cinco variables geográficas-fisiográficas en formato ráster y adicionando el residuo, tal como lo expresa la [ecuación 1](#). Para este proceso se desarrolló un script en lenguaje R ([anexo 1](#)), que utiliza los paquetes mencionados en la [tabla 1](#). Se repitió el proceso para la temperatura media del aire incorporando los coeficientes

de regresión, las variables del terreno mencionadas y el residuo respectivo.

Evaluación de la calidad de la predicción del modelo Regnie

La evaluación de la calidad de las interpolaciones se realizó mediante la comparación entre datos estimados de precipitación o temperatura con el modelo Regnie y datos de puntos de validación en 160 estaciones de precipitación y 29 de temperatura media del aire, elegidos aleatoriamente. Con el objetivo de comparar este modelo con otros métodos convencionales, se emplearon los modelos mecánicos IDW y Spline regularizado, aplicados con los mismos datos utilizados para el modelo Regnie. Tras la interpolación, se compararon los diferentes métodos mediante técnicas de proximidad del dato interpolado ([Sluiter, 2009](#)), y se calcularon estadísticos de prueba como el error medio (EM) y el error medio absoluto (EMA), cuyos valores óptimos son 0; la raíz cuadrada del error medio cuadrático de la predicción (RMSE) o su valor estandarizado (RMNSE), cuyos valores óptimos son la desviación estándar y 1 respectivamente ([Hengl, 2009](#); [Saz et al., 2010](#)). También se calculó el coeficiente de determinación (R^2), cuyo ajuste perfecto es igual a 1 ([Vargas et al., 2015](#)), y se construyeron diagramas de dispersión entre los promedios de las estaciones y los generados con los modelos de interpolación para comparar y evaluar su distribución. El esquema metodológico seguido para la aplicación del modelo de predicción Regnie se resume en la [figura 2](#).

RESULTADOS

La regresión lineal múltiple de la precipitación anual PPT_{Anual} obtenida mediante el modelo Regnie se presenta en la [ecuación 3](#):

$$PPT_{\text{Anual}} = 0.0001 \cdot x_1 - 0.0014 \cdot x_2 - 0.6299 \cdot x_3 - 0.4225 \cdot x_4 + 25.9729 \cdot x_5 + \text{residuo} \quad \text{ecuación 3}$$

Donde:

$$x_1 = \text{latitud}; x_2 = \text{longitud}; x_3 = \text{elevación}; x_4 = \text{exposición}; x_5 = \text{pendiente}$$

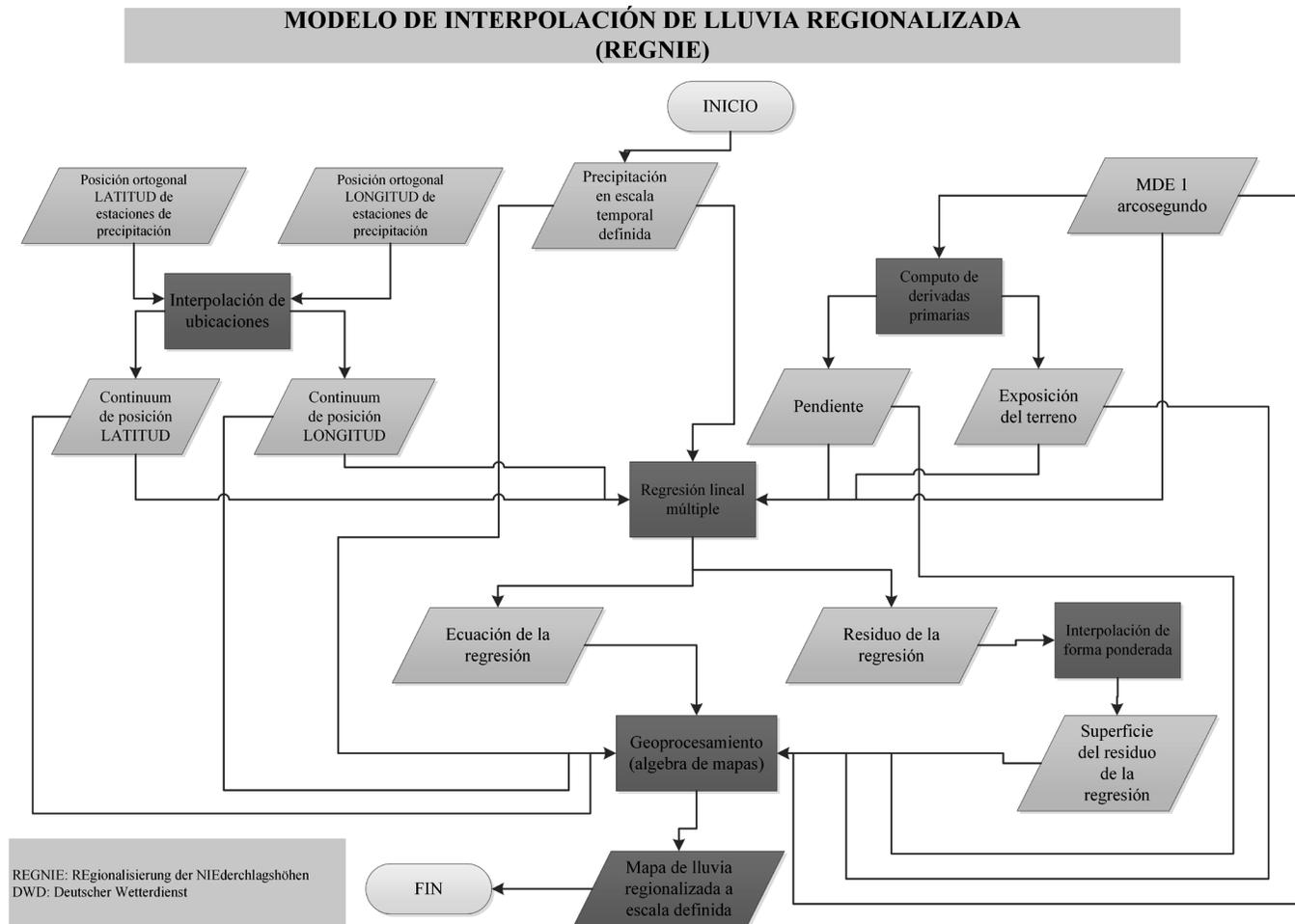


Figura 2. Esquema metodológico de la interpolación con el modelo Regnie.

La RLM para precipitación, obtenida mediante la técnica de mínimos cuadrados, obtuvo un coeficiente de determinación de 0.2 y un valor F de 84.7. Según los coeficientes de la ecuación, las variaciones espaciales de la precipitación fueron mejor explicadas por aspectos fisiográficos, particularmente la pendiente, que por la ubicación geográfica. Del mismo modo, se resaltan las relaciones negativas observadas con la elevación y la exposición, mientras se encontró una relación

positiva con la pendiente. El valor F indicó que el resultado de la regresión no fue producto del azar. Indicadores generales de los datos utilizados y los resultados obtenidos mediante las interpolaciones se encuentran en la [tabla 2](#). Los valores medios y las desviaciones estándar de los tres modelos de interpolación de la precipitación fueron mayores que los estadísticos calculados con los datos de las estaciones utilizadas ([tabla 2](#)).

Tabla 2. Comparación de valores de tendencia central de los datos utilizados y los generados por los modelos de interpolación para la precipitación

Variable	Valor en estaciones utilizadas	Modelo Regnie	Método IDW	Método Spline
Valor mínimo (mm)	242	0	242	0
Valor máximo (mm)	11 719	11 823	11 715	13 315
Valor medio (mm)	1955	2616	2546	2593
Desviación estándar (mm)	1276	1611	1556	1821

La regresión lineal múltiple obtenida para la temperatura media del aire $TMED_{anual}$ se expresa en la [ecuación 4](#):

$$TMED_{anual} = -1.109 \times 10^{-6} \cdot x_1 + 1.503 \times 10^{-3} \cdot x_2 - 0.0057 \cdot x_3 + \text{residuo} \quad \text{ecuación 4}$$

Donde:

$$x_1 = \text{latitud}; x_2 = \text{longitud}; x_3 = \text{elevación}$$

El modelo de temperatura media obtuvo un coeficiente de determinación de 0.94 y un valor F de 1192, lo que señala que el resultado de la regresión tampoco fue aleatorio, dado que el valor crítico según la tabla de distribución F de Fisher al 95 % de probabilidad con g.l. $v_1 = 3$ y g.l. $v_2 = 254$ es de 2.64. Por lo tanto, es extremadamente improbable que un valor F tan elevado se produjera por azar. El valor medio de los datos utilizados para la temperatura fue cercano al calculado con los modelos de interpolación; mientras la desviación estándar fue similar en solo el modelo Regnie, mientras fue menor y mayor en los modelos IDW y Spline, respectivamente ([tabla 3](#)).

Las superficies interpoladas de precipitación y temperatura se presentan en la [figura 3](#) y [figura 4](#).

Los estadísticos de prueba de las interpolaciones muestran, como era de esperarse por la naturaleza y variabilidad de las variables interpoladas, errores mucho mayores para la precipitación que para la temperatura ([tabla 4](#)).

Comparaciones entre los datos de las estaciones de prueba y los modelos de interpolación se muestran en los diagramas de dispersión para la precipitación ([figura 5a](#), [figura 5b](#) y [figura 5c](#)) y la temperatura media del aire ([figura 5d](#), [figura 5e](#) y [figura 5f](#)).

Tabla 3. Comparación de valores de tendencia central de los datos utilizados y los generados por los modelos interpolación para la temperatura.

Variable	Valor en estaciones utilizadas	Modelo Regnie	Método IDW	Método Spline
Valor mínimo (°C)	6.1	-3.6	6.1	-51.6
Valor máximo (°C)	30.9	30.8	30.8	51.2
Valor medio (°C)	22.9	22.7	22.8	22.9
Desviación estándar (°C)	5.6	5.8	4.4	7.4

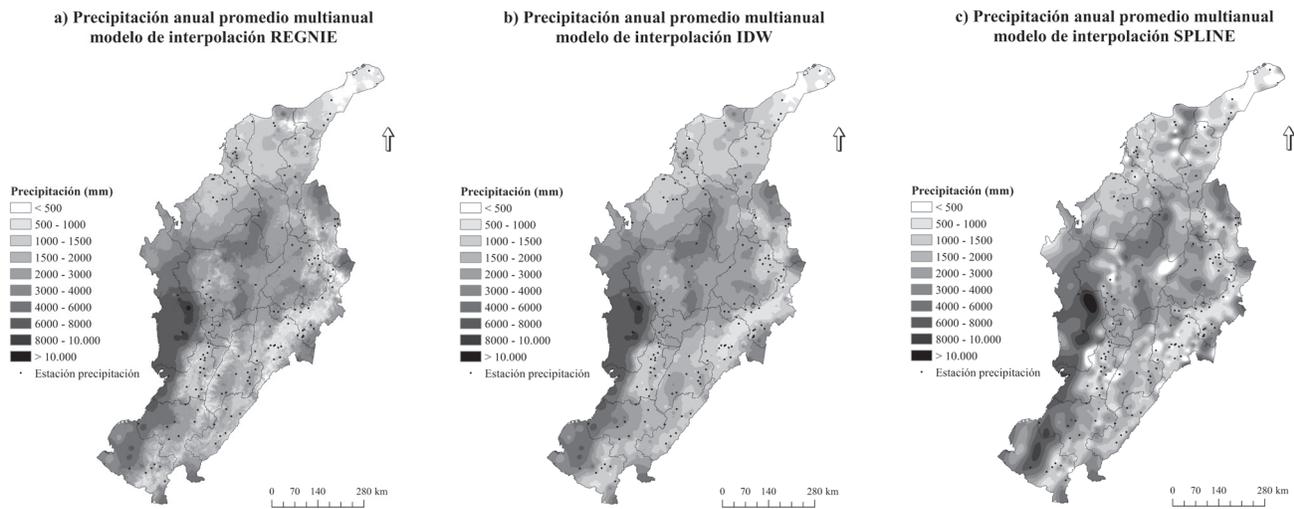


Figura 3. Interpolación de la precipitación promedio multianual con los modelos: Regnie (a), IDW (b) y Spline (c).

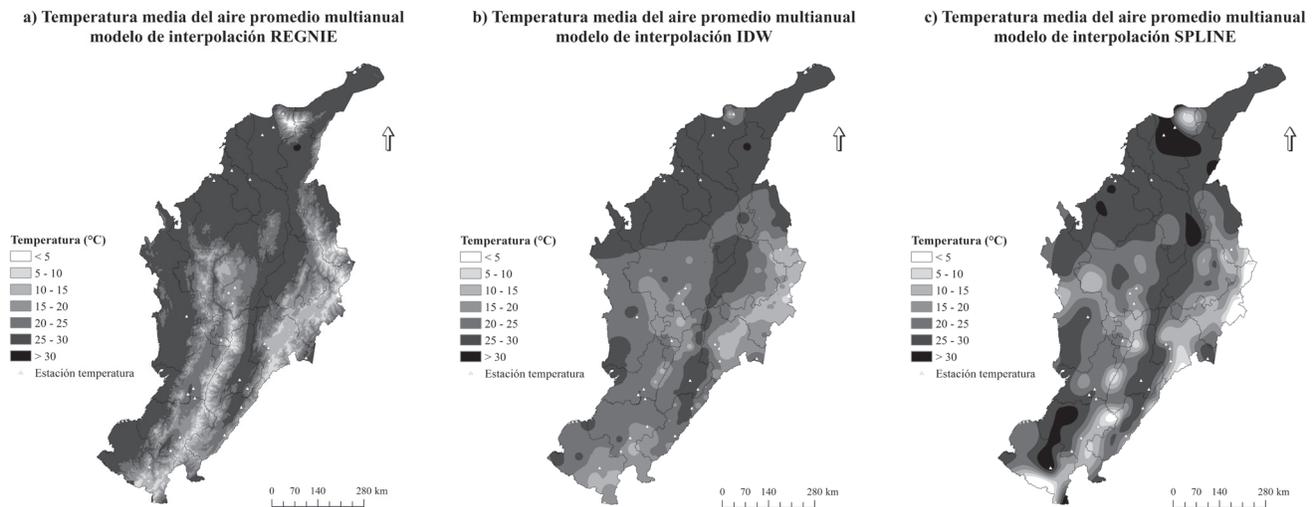


Figura 4. Interpolación de la temperatura media del aire promedio multianual con los modelos: Regnie (a), IDW (b) y Spline (c).

Tabla 4. Estadísticos de prueba de los modelos de predicción de la precipitación y temperatura.

Variable	Método	EM	EMA	RMSE	RMSNE	R ²
Precipitación	Regnie	55.63	336.53	575.26	0.50	0.81
	IDW	-8.83	270.79	518.75	0.45	0.80
	Spline	-23.92	372.41	533.88	0.40	-
Temperatura	Regnie	0.02	0.75	1.04	0.21	0.99
	IDW	0.26	2.09	3.30	0.75	0.76
	Spline	0.39	3.49	7.07	0.87	-

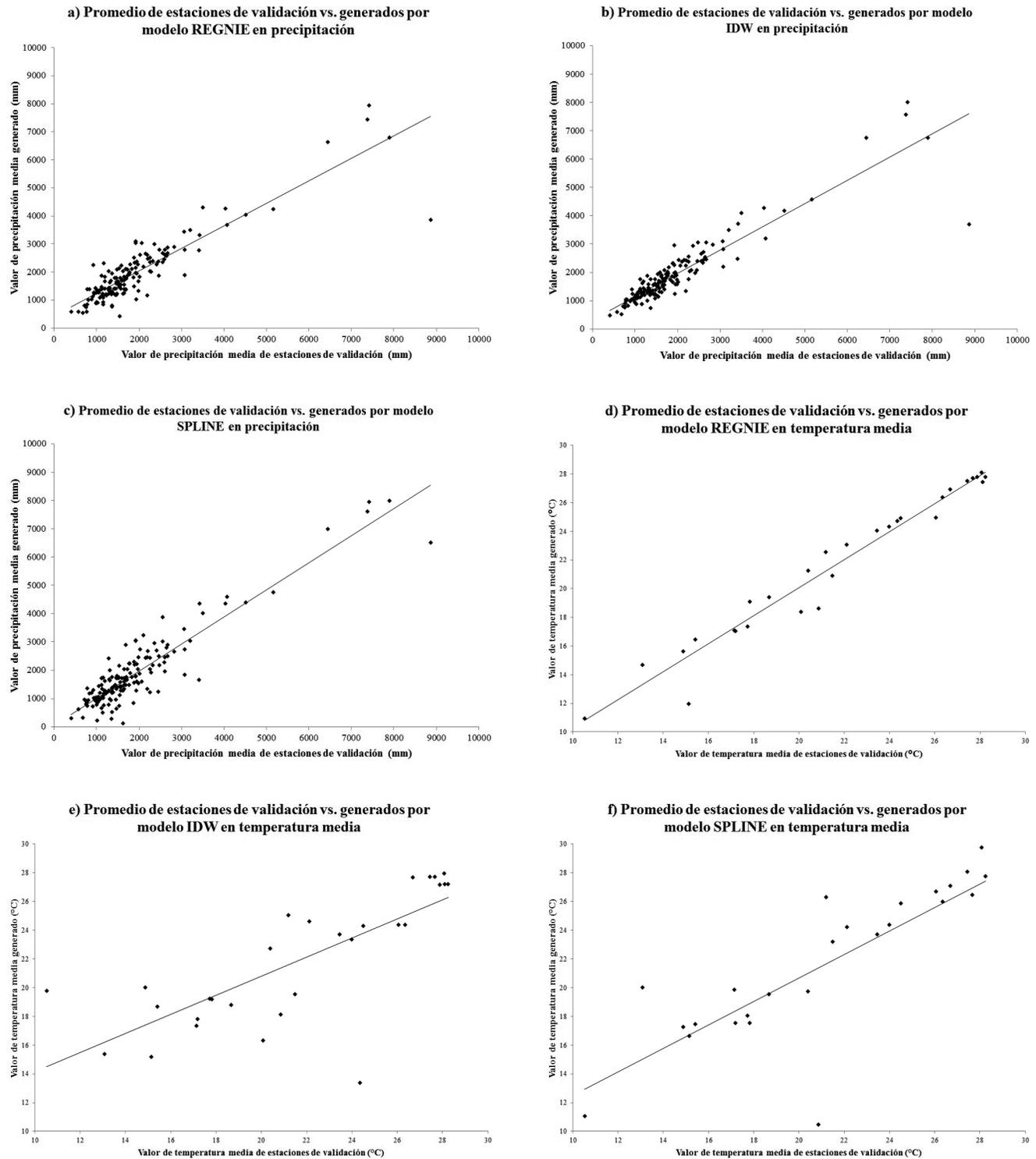


Figura 5. Diagramas de dispersión entre los datos de las estaciones de validación y las medias generadas para los modelos: Regnie en precipitación (a), IDW en precipitación (b), Spline en precipitación (c), Regnie en temperatura media (d), IDW en temperatura media (e) y Spline en temperatura media (f).

DISCUSIÓN

El modelo Regnie mostró el mejor desempeño para la interpolación de la precipitación según los estadísticos RMSE y RMSNE, mientras el IDW fue mejor según el EM y EMA. Los peores estadísticos de prueba los mostró el modelo Spline, excepto en el coeficiente de determinación R^2 , que por ser mayor que 1 no fue posible su comparación con los demás modelos. Como se observó con los estadísticos de tendencia central, y de acuerdo con lo reportado por Olaya (2011), Spline crea superficies espaciales que pueden alcanzar valores fuera del rango definido por los puntos de entrada, presentándose oscilaciones artificiales significativas.

El coeficiente de determinación de la RLM de 0.2, entre las variables geográficas, fisiográficas y la precipitación, es un indicador de baja relación lineal entre estas variables y la lluvia a escala anual. A pesar de esto, la calidad de la predicción arrojó estadísticos de prueba de la superficie derivada del modelo aceptables ($R^2 = 0.81$, EM = 55.63, EMA = 336.53 y RMSE = 0.50), contrastando datos estimados y datos de puntos de validación elegidos aleatoriamente. Además, se reconocen detalles no percibidos en las superficies generadas por IDW o Spline, especialmente en las zonas de alta montaña (v. gr. valles interandinos y el complejo montañoso aislado del norte de Colombia que corresponde a la sierra Nevada de Santa Marta). De lo anterior se puede afirmar que, tras la incorporación de aspectos fisiográficos, la interpolación mejoró su detalle espacial, debido a que el cálculo de la RLM se realizó independiente en cada pixel del MDE de entrada (30 x 30 metros) y luego fue re-escalado a una resolución de pixel de 1000 x 1000 metros, inferior a la distancia real entre estaciones, que se utiliza como referencia para definir la resolución o detalle espacial en los modelos IDW y Spline.

Los estadísticos de prueba de la temperatura media del aire mostraron que el método Regnie presentó mejores resultados que los otros dos

métodos implementados, resultado acorde con Bustamante (2003), quien afirmó que un modelo relativamente simple de interpolación lineal de la elevación, latitud y longitud produce resultados bastante satisfactorios para la interpolación de la temperatura (entre 80-90 % de la varianza explicada). La RLM mostró un alto coeficiente de determinación (0.94), lo que confirma la relación inversa entre la temperatura y la altitud explicada por el gradiente adiabático (Jones, 1996, citado por Hartkamp *et al.*, 1999; Cuadrat & Vicente, 2008).

Ante los resultados obtenidos, podría surgir la pregunta: ¿por qué no utilizar los métodos estocásticos en lugar de los mecánicos o determinísticos evaluados, dado que los primeros generan superficies de incertidumbre o error que describen la calidad de la predicción (Hartkamp *et al.*, 1999)? La respuesta radica en qué a pesar de sus ventajas y de ser considerados métodos de interpolación óptima (Kolmogorov, 1941; Gandin, 1963; citados por Montoya *et al.*, 2000), es necesario conocer a profundidad el comportamiento espacial del fenómeno representado, especialmente en aspectos como la estacionariedad, la independencia espacial y la isotropía (Hartkamp *et al.*, 1999). Por otra parte, de acuerdo con lo citado por Hewitson & Crane (2005) y Hofstra *et al.* (2008), la densidad de estaciones, las características propias de la variable a interpolar o la complejidad orográfica conduce a una mayor sensibilidad en los resultados que la elección del método de interpolación, por lo que no necesariamente un método estocástico genera mejoras en las superficies interpoladas (Dirks *et al.*, 2008; Wagner *et al.*, 2012).

Un aspecto fundamental para mejorar la precisión de los modelos es aumentar la disponibilidad de datos de entrada, lo cual, ante la baja densidad de estaciones climáticas de superficie en el área de estudio (0.003 estaciones/km² para precipitación y 0.0005 estaciones/km² para temperatura). Esto puede realizarse utilizando información de satélites meteorológicos como el TRMM (Tropical

Rainfall Measuring Mission), que terminó su operación en 2015, y los del programa Imerg (ambos de la Nasa), Meteosat de la ESA (Agencia Espacial Europea), datos de re-análisis como ERA-interim, NCEP/NCAR, Merra y otras fuentes de información climática disponibles, cuyos datos históricos de lluvia para la zona de estudio permiten la creación de estaciones virtuales que densifican la disponibilidad actual de información para la aplicación del modelo y permitirían mejorar su precisión. Se espera que en los próximos años la gran base de datos TRMM y las de nuevos sensores como el GPM Core Observatory (parte del Imerg) estarán disponibles para la creación de estaciones virtuales.

CONCLUSIONES

Los modelos propuestos para precipitación y temperatura media del aire son una primera aproximación a la aplicación de interpolaciones que incorporan variables geográficas y fisiográficas para Colombia a través de una Regresión Lineal Múltiple (RLM), utilizando los promedios de las estaciones disponibles (1440 para precipitación y 258 para temperatura del aire) en las regiones Andina, Caribe y Pacífica.

Se comprobó que la incorporación del MDE y sus derivadas (elevación, pendiente, exposición) en el modelo Regnie mejoraron la precisión y resolución espacial de las interpolaciones, principalmente de temperatura, que obtuvo un coeficiente de determinación de la RLM de 0.94 y menores valores de los errores estadísticos que los modelos comparados IDW y Spline. Este efecto, también observado en los diagramas de dispersión, se explica por la relación inversa entre la temperatura y la altitud debida al gradiente adiabático o variación de temperatura que experimentan las masas de aire en movimiento vertical. Si bien este efecto no se observó tan claramente en los estadísticos de las interpolaciones de precipitación (coeficiente de determinación de la RLM de 0.2), por

la alta variabilidad de los datos y la naturaleza de los estadísticos de evaluación, se observó que las interpolaciones con el modelo Regnie presentaron mayor detalle asociado con la resolución espacial introducida por el MDE (tamaño de pixel de 30 x 30 m.).

Según las medidas de tendencia central y los estadísticos analizados a las superficies interpoladas, el modelo Regnie permitió la generación de superficies espaciales de precipitación y temperatura media multianual del área de análisis más ajustadas a la realidad ($R^2 = 0.81$ y $R^2 = 0.99$, respectivamente) y con mayor detalle espacial, en comparación con los métodos de interpolación IDW y SPLINE. Lo anterior, debido a que el cálculo de la RLM se realizó independiente en cada pixel del MDE de entrada (30 x 30 metros) y luego fue re-escalado a una resolución de pixel de 1000 x 1000 metros, inferior a la distancia real entre estaciones, que se utiliza como referencia para definir la resolución o detalle espacial en los modelos IDW y Spline.

El modelo Regnie puede ser utilizado por institutos y centros de investigación, academia, entidades públicas y el sector privado para interpolar variables climáticas en estudios de investigación o de índole sectorial, logrando mayor resolución (MDE) y precisión en la explicación de los fenómenos formadores de lluvias y su distribución, así como la variación de la temperatura con la altitud. Por ello, es una interesante apuesta para mejorar los procesos y generación de productos e insumos en pronósticos meteorológicos y, dado que el cálculo del modelo se realiza pixel a pixel, se puede utilizar en combinación con otros modelos espaciales para el cálculo de variables como, por ejemplo, la evapotranspiración del cultivo de referencia o balances hídricos agrícolas, útiles en la determinación de la ganancia en biomasa y productividad de cultivos agrícolas.

Sin embargo, aunque el modelo Regnie presenta mejoras significativas en los resultados de interpolación de precipitación y temperatura media del

aire ($R^2 = 0.81$ y $R^2 = 0.99$, respectivamente), las complejas condiciones orográficas, fisiográficas y la ubicación ecuatorial del área de estudio hacen necesario incorporar en posteriores investigaciones y con el fin de hacer más preciso el modelo; variables como: continentalidad (entendida como la distancia a los océanos Pacífico y Caribe), distancia a máximos regionales de lluvias o estacionalidad (temporadas secas y lluviosas), los cuales son predictores que influyen en la formación de las lluvias y su distribución espacio-temporal.

Finalmente, dado que los procesos atmosféricos generadores de lluvias son diferentes en cada región comprendida por el estudio (Andina, Pacífica y Caribe), en futuros trabajos se sugiere implementar procesos de interpolación independientes para cada región que permitan refinar los resultados y disminuir la variabilidad de los datos de entrada del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los integrantes del Equipo de Agroclimatología de Corpoica por el suministro oportuno de los datos y las ilustraciones y complementos generados hacia este trabajo, el cual fue producto del Convenio 002 de 2013, denominado Reducción del riesgo y adaptación al cambio climático, establecido entre Corpoica y Fondo Adaptación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

El autor único es responsable de la obra en todos los aspectos que condujeron a la elaboración de su publicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abteilung Hydrometeorologie.** (2013). Regnie (Regionalisierte Niederschläge): Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung. Offenbach: Deutscher Wetterdienst-DWD. 9 p.
- Agnew, M., & Palutikof, J.** (2000). GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate Research*, 14, 115-127. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr014115>
- Alexandersson, H.** (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6, 661-675. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Bellprat, O., Kotlarski, S., Lüthi, D., & Schär, C.** (2012). Exploring perturbed physics ensembles in a regional climate model. *Journal of Climate*, 25, 4582-4599. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00275.1>
- Berg, P., Mosoley, C., & Haerter, J.** (2013). Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, 6, 181-183. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo1731>
- Buishand, T., Beersma, J., Sluiter, R., & Kroon, T.** (2008). Definitiestudie rasterdata meteorologie. De Bilt, KNMI / RWS Waterdienst. Intern rapport. 28 p.
- Bustamante, J.** (2003). Cartografía predictiva de variables climatológicas: Comparación de distintos modelos de interpolación de la temperatura en España peninsular. *Graellsia*, 2-3, 359-376. DOI: <https://doi.org/10.3989/graellsia.2003.v59.i2-3.252>
- Cuadrat, J., & Vicente, S.** (2008). Características espaciales del clima en La Rioja modelizadas a partir de sistemas de información geográfica y técnicas de regresión lineal. *Zubía Monográfico*, 20, 119-142.
- Dirks, K., Hay, J., Stow, C., & Harris, D.** (1998). High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island: Part II: Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, 208, 187-193. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00155-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00155-3)
- Guijarro, J.A.** (2014). Quality Control and Homogenization of Climatological Series. En S. Eslamian (ed.). *Handbook of Engineering Hydrology*, vol. 1: Fundamentals and Applications, cap. 24. EE. UU.:

- Francis and Taylor, CRC Group. DOI: <https://doi.org/10.1201/b15625-25>
- Giraldo, R.** (2002). Introducción a la geoestadística: teoría y aplicación. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Estadística. 94 p.
- Grasselt, R., Schüttemeyer, D., Warrach-Sagi, K., Ament, F., & Simmer, C.** (2008). Validation of TERRA-ML with discharge measurements. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(6), 763-773. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0334>
- Hartkamp, A., De Beurs, K., Stein, A., & White, J.** (1999). Interpolation Techniques for Climate Variables. CIMMYT. *NRG-GIS Series*, 99-01, 1-26.
- Hengl, T.** (2009). A practical guide to geostatistical mapping. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 290 p.
- Hengl, T., & Reuter, H.I.** (2008). Geomorphometry. Concepts, software, applications. AE Amsterdam: Elsevier. 796 p.
- Hengl, T., Gruber, S., & Shrestha, D.P.** (2003). Digital Terrain Analysis in Ilwis. Lecture notes and user guide. Enschede: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. 56 p.
- Hewitson, B., & Crane, R.** (2005). Gridded area-averaged daily precipitation via conditional interpolation. *Journal of Climate*, 18, 41-57. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI3246.1>
- Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P., & Frei C.** (2008). Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. *Journal of Geophysical Research*, 113, D21110. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JD010100>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).** (2005). Atlas climatológico de Colombia. Bogotá D.C.: Ideam. 219 p.
- Kotlarski, S., Hagemann, S., Krahe, P., Podzun, R., & Jacob, D.** (2012). The Elbe river flooding 2002 as seen by an extended regional climate model. *Journal of Hydrologic*, 472-473, 169-183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.020>
- Marquinez, J., Lastra, J., & García, P.** (2003). Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 270, 1-11. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00110-5)
- McCuen, R.** (1998). Hydrologic Analysis and Design. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. 814 p.
- Mejía, F., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J., Hoyos, C., Mantilla, R., Barco, J., Cuartas, A., Montoya, M., & Botero, B.** (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA*, 127, 7-26.
- Mesa, O., Poveda, G., & Carvajal, L.** (1997). Introducción al clima de Colombia. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia-sede Medellín. 390 p.
- Montoya, G., Eslava, J., Calderon, A., & Vega, F.** (2000). Implementación del método de Gandin para interpolar datos de precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 1, 25-30.
- Ninyerola, M., Pons, X., & Roure, J.** (2000). A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20, 1823-1841. DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(2001130\)20:14<1823::AID-JOC566>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1097-0088(2001130)20:14<1823::AID-JOC566>3.0.CO;2-B)
- Olaya, V.** (2011). *Sistemas de información geográfica*. Versión 1.0. Creative Commons Atribución. 877 p.
- Photiadou, C., Weerts, A., Van Den, B., & Hurk, J.** (2011). Evaluation of two precipitation data sets for the rhine river using streamflow simulations. *Hydrology and Earth System Science*, 15, 3355-3366. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-15-3355-2011>
- R Development Core Team.** (2008). R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de: <http://www.R-project.org>
- Rauthe, M., Steiner, H., U., Riediger, A., Mazurkiewicz, A., & Gratzki, A.** (2013). A Central European precipitation climatology—Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3), 235-256. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0436>
- Saz, M., Serrano, R., De Luis, M., & Longares, L.** (2010). Comparación de métodos de interpolación y de regresión para la cartografía de temperaturas máximas y mínimas absolutas: el caso de Navarra (norte de España) en 2009. En F. Fernández-García,

- E. Gallan-Gallego & R. Cañada-Torrecilla (eds.). *Clima, ciudad y ecosistemas* (pp. 473-484). Madrid: Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.
- Schwitalla, T., Bauer, H.S., Wulfmeyer, V., & Zängl, G.** (2008). Systematic errors of QPF in low-mountain regions as revealed by MM5 simulations. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(6), 903-919. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0338>
- Shepard, D.** (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-space data. En R. B. S. Blue & A.M. Rosenberg (eds.). *Proceedings of the 1968 ACM National Conference* (pp. 517-524). New York: ACM Press. DOI: <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Sluiter, R.** (2009). *Interpolation methods for climate data—Literature review*. De Bilt: KNMI. 24 p.
- Soenario, I., Plieger, M., & Sluiter, R.** (2010). Optimization of rainfall interpolation. De Bilt: KNMI. 31 p.
- Vargas, G., Ibáñez, L., & Arteaga, R.** (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 5-21. DOI: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.03.002>
- Wagner, P., Fiener, P., Wilken, F., Kumar, S., & Schneider, K.** (2012). Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*, 464-465, 388-400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.026>



ANEXOS

Anexo 1. Código en R y datos para realizar la interpolación Regnie usando R

```
##INTERPOLACION REGNIE (REGIONALISIERTE
NIEDERSCHLAGE) PARA SUPERFICIES REGIO-
NALIZADAS DE LLUVIA
##Por: Diego Alzate, Gustavo Araujo, Edwin Ro-
jas, Douglas Gómez y Fabio Martínez
##Equipo de Agroclimatología Corpoica
##Sistema de coordenadas proyectadas Colombia
Magna Bogotá (epsg:3116)

##INSTALARY CORRER PAQUETES REQUERIDOS
install.packages("raster")
install.packages("sp")
install.packages("fields")
install.packages("dplyr")
install.packages("gstat")
library(raster)
library(sp)
library(fields)
library(dplyr)
library(gstat)

#DEFINIR DIRECTORIO DE TRABAJO
#En el directorio de trabajo de estar el modelo de
elevación DEM (en formato *.tif) para el Extent de
trabajo y con sistema de proyección MAGNA Co-
lombia Bogotá.
setwd("//172.16.0.135/dfalzate/SIG")
#Se lee el archivo donde están los datos de preci-
pitación promedio multianual a interpolar
datos<- read.csv("Regnie_test_cund.csv", header
= T, sep = ";", dec = ",")
#Se transforma el dataset en clase
SpatialPointsDataFrame
datos1 <- datos
coordinates(datos1) = ~X + Y

##DERIVAR EXPOSICIÓN Y PENDIENTE DEL
DEM (el tiempo de procesamiento depende del ta-
maño y resolución del DEM)

DEM <- raster("dem_cund_magna.tif")#DEM del
área a interpolar
EXPOSICION <- terrain(DEM, opt=c('aspect'), uni-
t='degrees', neighbors=8)#Raster con valores de
dirección de la pendiente que es una variable de
la regresión lineal múltiple del método REGNIE
PENDIENTE <- terrain(DEM, opt=c('slope'), uni-
t='degrees', neighbors=8) #Raster con valores de
pendiente que es una variable de la regresión line-
al múltiple del método REGNIE

##EXTRAER VALORES DE EXPOSICIÓN, ALTI-
TUD Y PENDIENTE PARA LAS COORDENADAS
DE LAS ESTACIONES (Necesarios para obtener los
coeficientes de la regresión)
#EXPOSICIÓN
exposicion <- data.frame(coordinates(datos1), da-
tos1$CODIGO, extract(EXPOSICION, datos1))
names(exposicion)[1:4] <- c("X", "Y","CODIGO",
"ASP")
exposicion <- data.frame(exposicion$CODIGO,
exposicion$ASP)
names(exposicion)[1:2] <- c("CODIGO", "ASP")
datos = merge(datos,exposicion,by="CODIGO")
#ALTITUD
dem <- data.frame(coordinates(datos1), datos1$-
CODIGO, extract(DEM, datos1))
names(dem)[1:4] <- c("X", "Y","CODIGO", "Z")
dem <- data.frame(dem$CODIGO, dem$Z)
names(dem)[1:2] <- c("CODIGO", "DEM")
datos = merge(datos,dem,by="CODIGO")
#PENDIENTE
pendiente <- data.frame(coordinates(datos1), da-
tos1$CODIGO, extract(PENDIENTE, datos1))
names(pendiente)[1:4] <- c("X", "Y","CODIGO",
"PEN")
pendiente <- data.frame(pendiente$CODIGO,
pendiente$PEN)
names(pendiente)[1:2] <- c("CODIGO", "PEN")
```

```
datos = merge(datos,pendiente,by="CODIGO")  
##Suprimir filas con valores NA del archivo datos  
datos1<-datos[complete.cases(datos),]  
##Crear raster extent para interpolación Spline (las  
variables de posición geográfica Latitud y Longitud  
se interpolan por el método Spline)  
p <- raster(extent(c(908851, 1115425, 901372,  
1139100)))#Aqui las coordenadas dependen del  
área a interpolar  
res(p) <- c(500,500)#resolucion de 500 metros x  
500 metros
```

```
##OBTENER RASTER DE Y (LATITUD) POR EL  
MÉTODO DE INTERPOLACION SPLINE  
xy <- data.frame(datos$Y, datos$X) # get raster cell  
coordinates  
spline1 <- Tps(xy,datos$Y) # thin plate spline  
spline.lat <- interpolate(p,spline1)  
proj4string(spline.lat) <- CRS("+init=epsg:3116")
```

```
##INTERPOLACIÓN DE X (LONGITUD) POR EL  
MÉTODO DE INTERPOLACION SPLINE  
spline2 <- Tps(xy,datos$X) # thin plate spline  
spline.long <- interpolate(p,spline2)  
proj4string(spline.long) <- CRS("+init=epsg:3116")
```

```
##AJUSTAR CARACTERÍSTICAS Y RESOLU-  
CIÓN DEL DEM, EXPOSICIÓN Y PENDIENTE  
A LA RESOLUCIÓN DEL RASTER DE LATITUD  
DE 500m PARA FACILITAR EL PROCESO DE  
INTERPOLACIÓN  
EXPOSICION <- resample(EXPOSICION, spline.lat)  
PENDIENTE <- resample(PENDIENTE, spline.lat)  
DEM <- resample(DEM, spline.lat)  
##Definir Extent de la Grilla para la interpolación  
REGNIE:  
x.range <- as.numeric(c(908851, 1115425)) # min/  
max longitud del area de interpolación  
y.range <- as.numeric(c(901372, 1139100)) # min/  
max latitud del area de interpolación  
##Crear un data frame de todas las combinaciones  
de vectores y factores.  
# expandir puntos a la grilla
```

```
grd <- expand.grid(x = seq(from = x.range[1], to =  
x.range[2], by = 500), y = seq(from = y.range[1],  
to = y.range[2], by = 500)) # expandir puntos a la  
grilla  
#Definir coordenadas espaciales para crear un ob-  
jeto georreferenciado.  
coordinates(grd) <- ~x + y  
##Asignar estructura de grilla:  
gridded(grd) <- TRUE  
proj4string(grd) <- CRS("+init=epsg:3116")
```

```
#REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE CON LOS PARA-  
METROS PPT MULTIANUAL, EXPOSICIÓN, ALTI-  
TUD, PENDIENTE, LOCALIZACIÓN (LAT, LONG)  
RLM = lm(PROM_ANUAL ~ ASP + DEM + PEN +  
X + Y, data=datos1)  
#Obtener coeficientes de la regresión  
cons <- summary(RLM)$coefficients[1,1]  
asp <- summary(RLM)$coefficients[2,1]  
dem <- summary(RLM)$coefficients[3,1]  
pen <- summary(RLM)$coefficients[4,1]  
long <- summary(RLM)$coefficients[5,1]  
lat <- summary(RLM)$coefficients[6,1]
```

```
##INTERPOLACIÓN RESIDUO  
residuo = datos1$PROM_ANUAL-(asp*da-  
tos1$ASP)-(dem*datos1$DEM)-(pen*da-  
tos1$PEN)-(long*datos1$X)-(lat*datos1$Y)  
residuo2 <- as.data.frame(residuo)  
residuo3 <-as.data.frame(na.omit(residuo2))  
d <- as.data.frame(row.names(residuo3))  
residuo4 <- data.frame(residuo3, d)  
names(residuo4)[1:2] <- c("residuo","ID")  
f <- data.frame(datos1$Y, datos1$X, residuo2)  
f2 <- as.data.frame(count(residuo4, residuo) %>%  
left_join(f))  
names(f2)[1:4] <- c("residuo","n", "Y","X")  
coordinates(f2) = ~X + Y  
proj4string(f2) <- CRS("+init=epsg:3116")  
idw.res <- idw(formula = residuo ~ 1, locations =  
f2, newdata = grd)  
raster.idw <- raster(idw.res)
```

Residuo <- resample(raster.idw, DEM) #Ajustar características y resolución del raster Residuo a la resolución del DEM de 500m

ALGEBRA DE MAPAS PARA OBTENER LA INTERPOLACIÓN FINAL POR EL MÉTODO REGNIE

##ECUACION REGNIE

REGNIE_PPT <- (EXPOSICION*asp) + (DEM*dem) + (PENDIENTE*pen) + (spline.lat*lat) + (spline.long*long) + Residuo

#Quitar valores negativos al resultado
 REGNIE_PPT[REGNIE_PPT<0] <- 0

##Exportar Raster con el resultado REGNIE a la carpeta de trabajo

writeRaster(REGNIE_PPT, paste("REGNIE_PPT_", "PROM_1980_2011", ".tif", sep=""), driverna-
 me = "GTiff", overwrite=TRUE)

Estructura del archivo *.csv con los datos climáticos por estación

Código	Altitud	Departamento	Municipio	Nombre	Prom_anual	Y	X
2119003	1635	Cundinamarca	Tibacuy	Tibacuy	1164.8	972570.3	958156.2
2119009	1900	Cundinamarca	Cabrera	Cabrera	926.2	932642.3	954907.3
2119024	1450	Cundinamarca	Venecia	Ospina Perez	1569.7	943108	954338.8
2119031	1900	Cundinamarca	Fusagasuga	Pinar el	1705	976978.6	971983.7
2119033	1950	Cundinamarca	cabrera	Nunez	1382.6	923674.3	951999.8
2119035	2700	Cundinamarca	San Bernardo	Tulcan el	767.7	950937.8	968662.8
2119506	950	Cundinamarca	Pandi	Pandi	1243.1	955395	954490.1
2119507	2256	Cundinamarca	Pasca	Pasca	887.5	968368	973997.5
2119511	2050	Cundinamarca	Cabrera	Penas Blancas	1000.2	930179.8	959326.8
2119512	1460	Cundinamarca	Fusagasuga	Ita Valsalice	1400.3	977844.6	964633.6
2120016	2800	Cundinamarca	Choconta	Panonia	987.9	1051073.8	1038054.5
2120026	3062	Cundinamarca	Zipaquira	Ventalarga	1012.4	1052025.2	1003050.3
2120027	2640	Cundinamarca	Choconta	Saucio	789	1056700	1041162.4
2120043	2700	Cundinamarca	Villapinzon	Villapinzon	690.8	1066789.6	1052939.2
2120051	2618	Cundinamarca	Sibate	Sibate Apostolica	649.9	991207.3	980857.5
2120055	2725	Cundinamarca	Subachoque	Union la-el Rosal	984	1029911.1	980867
2120060	2800	Cundinamarca	Sibate	Guarani el Penon	1066.6	981993.7	975305.8
2120062	2820	Cundinamarca	Choconta	Piscis	1239.1	1053419.9	1042208.4
2120069	2610	Cundinamarca	Facatativa	Tesoro-vertientes	1089.9	1022541.1	973469.6
2120074	2655	Cundinamarca	Zipaquira	Zipaquira	804.9	1046496.5	1008595.3
2120078	2780	Cundinamarca	Guatavita	Potrero Largo	1155.9	1036833.5	1032944.5
2120080	2700	Cundinamarca	Guasca	San Jose	800.5	1042812.6	1019685.9
2120088	3140	Cundinamarca	Tausa	Salitre el-Neusa	868	1064927.1	1008593.1
2120103	3080	Cundinamarca	La Calera	Sta Teresa	949.6	1007793.9	1015996.6
2120105	2750	Cundinamarca	Gachancipa	Lourdes	952.5	1042764.6	1023604.5
2120106	3160	Cundinamarca	Zipaquira	Pantano Redondo	1177.9	1049435.9	1004892.4



DECLARACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS EDITORIALES Y NORMAS ÉTICAS DE COLOMBIA FORESTAL

“Este documento 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 o ha sido sometida y/o 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 40 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 30 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^{ta} 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 & Ruiz (1996),
- ... (Castro, 1945, 1975; González & 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 & 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., & 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., & 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 & Row, Publisher. 166 p.
- Mahecha, G., Rosales, H., Ruiz, G., & 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 & L.J. Torres (eds.). Los árboles 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 & 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 gráficas 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. No utilice color en las figuras, recuerde que la publicación será en blanco y negro. 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 figuras 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 escríbanos a la dirección de correo electrónico 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 upper-case 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 & Ruiz (1996),
- (Castro, 1945; González & 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 & 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., & 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., & 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 & Row, Publisher. 166 p.

Mahecha, G., Rosales, H., Ruiz, G., & 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 & 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 & 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. Do not use color in illustrations as they will be published in black and white. 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.org>) or The International Plant Names Index (<http://www.ipni>).

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 author instructions visit <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/index> or write to the journal at colombiaforestal.ud@correo.udistrital.edu.co.